



Titulación:

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Alumno:

Raül Canchado Franco

Título TFG:

Estudio, diseño y puesta en marcha de un banco de pruebas
para la determinación de fugas en sistemas hidráulicos

Director/a del TFG:

Salvador de las Heras Jiménez / Albert Carbó Bench

Convocatoria de entrega del TFG:

Junio de 2015

Contenido de este volumen:

DOCUMENTO 1.- MEMORIA



Agradecimientos

Quisiera agradecer a Salvador de las Heras, director de este TFG, y a Albert Carbó, codirector del mismo, la ayuda y el soporte prestados durante su desarrollo.

Índice de contenidos

1	Objetivo	11
2	Alcance	11
3	Especificaciones	12
4	Justificación	12
5	Antecedentes	13
5.1	Introducción	13
5.2	Clasificación de los métodos de detección	13
5.2.1	Métodos internos	13
5.2.2	Métodos externos	14
5.3	Estudio base del banco de pruebas	16
5.4	Banco de pruebas preexistente	27
5.4.1	Descripción	27
5.4.2	Parámetros de diseño	29
6	Planteamiento	35
6.1	Introducción	35
6.2	Instrumentación	35
6.3	Puntos a definir en el banco de pruebas	37
7	Selección de la solución y justificación	39
7.1	Instrumentación instalada	39
7.1.1	Electroválvula de control del caudal de entrada	39
7.1.2	Sensores de presión	45
7.1.3	Caudalímetro	51

7.1.4	Tarjeta de adquisición de datos	52
7.1.5	Filtro paso bajo.....	57
7.1.6	Instrumentación virtual	57
7.2	Conexión de la instrumentación.....	64
7.3	Visión global del banco de pruebas	68
7.4	Definición de los ensayos	76
7.4.1	Localización mediante un método acústico.....	76
7.4.2	Ensayo de fuga en tubería presurizada sin caudal	78
8	Desarrollo y resultados	79
8.1	Localización mediante un método acústico	79
8.1.1	Procesado de datos	79
8.1.2	Resultados obtenidos.....	84
8.1.3	Conclusiones de las gráficas $g(t)$	94
8.1.4	Eliminación de picos aleatorios en la respuesta $g(t)$	95
8.2	Ensayo de fuga en tubería presurizada sin caudal.....	98
9	Resumen económico	100
10	Impacto ambiental del estudio	101
10.1	Medioambiente y ciclo de vida.....	101
10.2	Problemas medioambientales asociados	101
10.3	Marco normativo medioambiental.....	102
10.4	Residuos generados asociados.....	102
10.5	Emisiones generadas asociadas	103
10.6	Actuaciones y buenas prácticas	103
10.7	Consideraciones finales.....	104

11	Planificación y programación	105
11.1	Fase desarrollada	105
11.2	Planificación de fases posteriores	108
12	Seguridad y salud	109
12.1	Marco normativo	109
12.2	Descripción del trabajo y su entorno.....	110
12.2.1	Tipo de trabajo y ubicación.....	110
12.2.2	Interferencias	111
12.2.3	Unidades que componen el trabajo.....	111
12.3	Riesgos y normas de actuación.....	111
12.3.1	Instalación neumática y de fontanería	112
12.3.2	Instalación eléctrica	112
12.3.3	Instalación de instrumentos de medida y conexión hardware 113	
12.3.4	Realización de pruebas y ensayos.....	113
12.4	Equipos de protección individual	114
13	Conclusiones y recomendaciones	115
14	Lista de abreviaturas y símbolos.....	117
15	Bibliografía	120

Índice de figuras

Figura 5.1. Esquema de la tubería, según Watanabe (1).....	17
Figura 5.2. Término $G1(\omega)$ de la función de transferencia de Watanabe (1)	22
Figura 5.3. Término $G2(\omega)$ de la función de transferencia de Watanabe (1)	22
Figura 5.4. Término $G3(\omega)$ de la función de transferencia de Watanabe (1)	22
Figura 5.5. Función de transferencia $G(\omega)$ de Watanabe (1).....	23
Figura 5.6. Función $g(t)$ cuando existe una fuga en $l_1 < L / 2$	25
Figura 5.7. Función $g(t)$ cuando existe una fuga en $l_2 > L / 2$	25
Figura 5.8. Croquis del bloque con los orificios.....	28
Figura 5.9. Croquis de la instalación preexistente.....	29
Figura 6.1. Conversión analógica-digital, según (5)	36
Figura 7.1. Sección electroválvula serie 861 <i>Matrix</i> ® instalada	39
Figura 7.2. Gráfica nivel de apertura - C_N de la válvula <i>Matrix</i> ® instalada.....	42
Figura 7.3. Bloques de conexiones tarjeta <i>PCM 8130</i> de <i>Matrix</i> ®, según (7)	44
Figura 7.4. Configuración interruptor DIP tarjeta <i>PCM 8130 Matrix</i> ®, de (7)	45
Figura 7.5. Transductor de presión <i>601A Kistler</i> ®, cotas en mm, de (8)	46
Figura 7.6. Amplificador de carga <i>5039A Kistler</i> ®, de (9)	46
Figura 7.7. Caja de conexiones y maniobra para los transductores piezoeléctricos y amplificadores de carga <i>Kistler</i> ®. Laboratorio del Dpto. de Mecánica de Fluidos de la ETSEIAT - UPC	47
Figura 7.8. Transmisor de presión <i>VDO</i> ®	48
Figura 7.9. Circuito para transmisor de presión <i>VDO</i> ®	48
Figura 7.10. Caja de conexiones, fuente de alimentación y circuito para los tres transmisores de presión <i>VDO</i> ®. Laboratorio del Dpto. de Mecánica de Fluidos de la ETSEIAT - UPC	49

Figura 7.11. Esquema caja de conexiones, fuente de alimentación y circuito para los dos transmisores de presión VDO®	50
Figura 7.12. Esquema de conexiones en bornes de la caja para los transmisores de presión VDO®.....	51
Figura 7.13. Caudalímetro modelo M-120SLPM-D de Alicat Scientific®, extraído de (10).	52
Figura 7.14. Conector Mini-DIN 8 de salida del caudalímetro Alicat Scientific® instalado, extraído de (10).....	52
Figura 7.15. Bloque de conexiones de la tarjeta PCI-1200 de National Instruments®, extraído de (11).....	53
Figura 7.16. Descripción de las señales del bloque de conexiones de la tarjeta PCI-1200 de National Instruments®, extraído de (11)	54
Figura 7.17. Configuración canales de entrada de la tarjeta PCI-1200 (1 / 3)	55
Figura 7.18. Configuración canales de entrada de la tarjeta PCI-1200 (2 / 3)	55
Figura 7.19. Configuración canales de entrada de la tarjeta PCI-1200 (3 / 3)	56
Figura 7.20. Configuración canal de salida de la tarjeta PCI-1200	56
Figura 7.21. Filtro paso bajo instalado	57
Figura 7.22. Paleta de controles, herramientas y funciones en LabView® ...	58
Figura 7.23. Diagrama de flujo extraído de (12) LabView®.....	59
Figura 7.24. Diagrama de bloques programado con LabView® (1 / 2)	61
Figura 7.25. Diagrama de bloques programado con LabView® (2 / 2)	62
Figura 7.26. Panel frontal del archivo programado en LabView®	63
Figura 7.27. Esquema de conexiones, excepto tarjeta PCI-1200	65
Figura 7.28. Esquema de conexiones tarjeta PCI-1200, fase de pruebas	66

Figura 7.29. Esquema de conexiones tarjeta <i>PCI-1200</i> , fase de ensayos....	67
Figura 7.30. Instalación del caudalímetro en un punto de fuga simulado	68
Figura 7.31. Bloque con orificios tapados cuando no son usados	68
Figura 7.32. Bloque de conexiones tarjeta <i>PCI-1200</i> y filtro pasa bajo (izq.)	69
Figura 7.33. Electroválvula <i>Matrix®</i> al inicio del tramo de tubería	69
Figura 7.34. Detalle conexiones en la tarjeta que controla la electroválvula.	70
Figura 7.35. Caja conexiones y maniobra transductores de presión <i>Kistler®</i>	70
Figura 7.36. Transductor de presión <i>Kistler®</i> instalado	71
Figura 7.37. Transmisor de presión <i>VDO®</i> instalado.....	71
Figura 7.38. Sensores de presión <i>VDO®</i> y <i>Kistler®</i> instalados	72
Figura 7.39. Conmutador control <i>LabView®</i> /manual de la electroválvula	72
Figura 7.40. Conmutador de las señales VDO 1 y VDO 2, fase de pruebas.	73
Figura 7.41. Válvula de bola manual en el extremo final de la tubería.....	73
Figura 7.42. Depósito acumulador para suministro de aire a presión	74
Figura 7.43. Fuente de alimentación 24 VDC y ordenador utilizado	74
Figura 7.44. Perspectiva general del banco de pruebas	75
Figura 8.1. Lecturas de uno de los ensayos con fuga en PO 3+.....	85
Figura 8.2. Lecturas de uno de los ensayos sin fuga	85
Figura 8.3. Función $g(t)$ ensayo pos2nValSalAp25Pacum3Qfuga0SLPMtensValv5V	87
Figura 8.4. Función $g(t)$ ensayo pos2nValSalAp25Pacum3Qfuga36SLPMtensValv5V	87
Figura 8.5. Función $g(t)$ ensayo pos2nValSalAp25Pacum5Qfuga0SLPMtensValv5V	88

Figura	8.6.	Función	$g(t)$	ensayo
pos2nValSalAp25Pacum5Qfuga36SLPMtensValv5V 88				
Figura	8.7.	Función	$g(t)$	ensayo
pos2nValSalAp25Pacum3Qfuga0SLPMtensValv8V 89				
Figura	8.8.	Función	$g(t)$	ensayo
pos2nValSalAp25Pacum3Qfuga36SLPMtensValv8V 89				
Figura	8.9.	Función	$g(t)$	ensayo
pos2nValSalAp25Pacum5Qfuga0SLPMtensValv8V 90				
Figura	8.10.	Función	$g(t)$	ensayo
pos2nValSalAp25Pacum5Qfuga36SLPMtensValv8V 90				
Figura	8.11.	Función	$g(t)$	ensayo
pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga0SLPMtensValv5V 92				
Figura	8.12.	Función	$g(t)$	ensayo
pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga36SLPMtensValv5V 92				
Figura	8.13.	Función	$g(t)$	ensayo
pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga0SLPMtensValv8V 93				
Figura	8.14.	Función	$g(t)$	ensayo
pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga36SLPMtensValv8V 93				
Figura	8.15.	Función	$g(t)$	ensayo
pos3pValSalAp0Pacum5Qfuga36SLPMtensValv5V 94				
Figura	8.16.	Función	$g(t)$	promediada, ensayo
pos2nValSalAp25Pacum3Qfuga0SLPMtensValv5V 96				
Figura	8.17.	Función	$g(t)$	promediada, ensayo
pos2nValSalAp25Pacum3Qfuga36SLPMtensValv5V 96				
Figura	8.18.	Función	$g(t)$	promediada, ensayo
pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga0SLPMtensValv5V 97				
Figura	8.19.	Función	$g(t)$	promediada, ensayo
pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga36SLPMtensValv5V 97				
Figura	8.20.	Función	$g(t)$	ensayo
pos2nValSalAp0Pacum5Qfuga36SLPMtensValv0V_fugapresurizada 99				

Figura	8.21.	Función	$g(t)$	ensayo
pos3pValSalAp0Pacum5Qfuga36SLPMtensValv0V_fugapresurizada 99				
Figura 11.1. Programación de la fase desarrollada (1/2) 106				
Figura 11.2. Programación de la fase desarrollada (2/2) 107				

1 OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es el de diseñar y llevar a cabo la instalación de un banco de pruebas, a partir de una instalación preexistente, que nos permita determinar pérdidas en sistemas de tuberías de transporte de fluidos basándonos en estudios teóricos existentes en el campo de la detección y localización de pérdidas en tuberías a partir de la respuesta de éstos en el dominio temporal y frecuencial.

2 ALCANCE

El alcance del trabajo realizado incluye:

- La justificación del uso de la instalación preexistente.
- La elección de la instrumentación utilizada (sensores de presión, caudalímetro) y del instrumento de control (electroválvula actuadora), así como de su ubicación y forma de conexión.
- La instalación de comunicación entre el dispositivo de entrada/salida para la adquisición de datos y la generación de señal de control, con los instrumentos de medida y de control.
- La calibración de los instrumentos que lo requieran.
- La programación mediante el software *LabView®* del archivo para la gestión del banco de pruebas durante los ensayos.
- La definición y realización de los ensayos a llevar a cabo en el banco de pruebas.
- El tratamiento de los datos arrojados por los ensayos y la obtención de resultados comparables.
- La comparación de los resultados experimentales obtenidos con los resultados previstos por los estudios teóricos existentes, la validación de éstos si es el caso, y la elaboración de conclusiones y recomendaciones.

El trabajo no incluye, por ser la base de partida un banco de pruebas parcialmente comenzado, el diseño e instalación de la tubería y accesorios sobre la que se llevará a cabo el trabajo, si bien sí su justificación.

Tampoco incluye el diseño y fabricación de los circuitos electrónicos que requieren los sensores de presión para la conversión de la señal de medida en términos de tensión o en el rango compatible con el dispositivo de adquisición de datos. La razón es que estos circuitos ya están disponibles en el laboratorio y provienen de otros trabajos realizados con anterioridad.

3 ESPECIFICACIONES

Los requerimientos del trabajo son los siguientes:

- El banco de pruebas debe representar el caso de una tubería en la que se puede controlar la forma de su caudal de entrada mediante un rizado y/o un escalón, debe contar con dos sensores de presión uno al inicio y otro al final de ésta que permitan la lectura de presiones dinámicas, y disponer a lo largo de su longitud de orificios en los que poder simular una pérdida de caudal el cual deberá medirse mediante un caudalímetro.
- El banco de pruebas deberá controlarse utilizando la aplicación informática *LabView®* v.5 de *National Instruments®*.
- El dispositivo de entrada/salida para la adquisición de datos será el dispositivo *PCI-1200* de *National Instruments®*, que permitirá tanto la adquisición de datos como la generación de la señal del instrumento de control.
- El banco de pruebas debe realizarse, en lo que se refiere a los equipos, instrumentos de medida y control, y dispositivos de *hardware* y *software*, con material existente en el laboratorio del Departamento de Mecánica de Fluidos de la ETSEIAT-UPC, en la medida de lo posible.
- Se partirá de una instalación preexistente del banco de pruebas, consistente en una tubería de trazado helicoidal cilíndrico, montada sobre una estructura, y dotada de los accesorios necesarios en puntos intermedios donde se pueden instalar instrumentos de medida de presión y de caudal.

4 JUSTIFICACIÓN

El trabajo realizado se justifica por un lado por la necesidad de corroborar el estudio teórico escogido sobre localización de fugas en tuberías con los resultados experimentales que se puedan obtener en el laboratorio, y por otro lado por la necesidad de determinar si la instrumentación y el proceso de adquisición de datos planteado, de uso común en laboratorios como el que nos ocupa, es suficientemente competente como para detectar la fenomenología expuesta en el estudio teórico que permite tal detección y localización de fugas.

5 ANTECEDENTES

5.1 Introducción

El trabajo desarrollado pretende definir, construir y testar un banco de pruebas que permita ensayar el flujo de un fluido en las condiciones definidas en el estudio realizado por K. Watanabe(1) que se resume en este capítulo, el cual teóricamente permite detectar y/o localizar los puntos donde existen fugas a lo largo de una tubería.

En este estudio K. Watanabe (1) describe el desarrollo teórico de un método para detectar y localizar fugas en tuberías de transporte de gas mediante un método acústico indirecto consistente en introducir una señal de entrada acústica en el inicio de un tramo de tubería para posteriormente medir la onda acústica en el extremo final. Aplicando ciertas transformaciones matemáticas sobre la respuesta obtenida en el extremo final, concluye que ésta muestra un pico en el dominio temporal en caso de existir una fuga, y el retraso con que se observa dicho pico se relaciona con la localización de la fuga a lo largo de la tubería. Este estudio se detallan en el apartado 5.3.

5.2 Clasificación de los métodos de detección

Las redes de tuberías son una manera eficiente y segura de transportar fluidos pero presentan el inconveniente de sufrir fugas difíciles de detectar y de localizar. Los sistemas de detección de fugas, conocidos por sus siglas en inglés LDS (leak detection systems), se pueden clasificar para líquidos de una fase según el American Petroleum Institute (2) en métodos internos y métodos externos.

5.2.1 Métodos internos

Los métodos internos utilizan instrumentación para determinar parámetros internos dentro de la tubería como pueden ser la velocidad, la presión o la temperatura del fluido, los cuales son procesados para inferir la existencia y localización de una fuga. De ellos citamos, según (2), los siguientes:

5.2.1.1 Monitorización de la presión y el caudal

Una fuga en una tubería produce un cambio en el flujo del fluido que circula y, en consecuencia, de la presión y el caudal. La instrumentación de la tubería para tomar lecturas de estas variables permite detectar la fuga y, en caso de

disponer de diferentes puntos de medida a lo largo del trazado también de acotar su localización. Este método sería válido obviamente para flujo estacionario.

5.2.1.2 Ondas acústicas de presión

Este método se basa en el hecho de que la existencia de una fuga en una tubería por la que circula un fluido genera una onda de presión que se propaga en ambos sentidos del eje de la tubería, conducida por las paredes de ésta, y cuya velocidad de propagación es la del sonido en el fluido que circula por la tubería. La lectura dada por los sensores de presión en diferentes puntos y su análisis permiten localizar el punto donde se encuentra la fuga.

5.2.1.3 Métodos de balance

Se basan en el principio de conservación de la masa y en el hecho de que en condiciones de flujo estacionario la no conservación implica la existencia de una fuga. Requiere de la instalación de caudalímetros en diferentes puntos la tubería.

5.2.1.4 Métodos estadísticos

Estos métodos (2) van desde la simple comparación de que un parámetro del flujo se encuentre entre dos valores que estadísticamente determinan la existencia de una anomalía que puede ser una fuga, a los más sofisticados que realizan lecturas de presión y caudal en tiempo real y las comparan con un patrón asociado a fugas, el cual se ha determinado estadísticamente de forma previa. Estos métodos en muchos casos utilizan como base otros métodos descritos anteriormente como puede ser el balance de masa a lo largo de la tubería.

5.2.2 Métodos externos

Los métodos externos utilizan instrumentación para determinar parámetros externos de la tubería como pueden ser la temperatura de las paredes, variables eléctricas, emisiones acústicas o concentraciones de gas. Muchos de estos métodos son de aplicación tan solo en casos muy determinados de tipo de fluido y de instalación. De ellos citamos según la clasificación dada por (2) los siguientes:

5.2.2.1 Cable sensor

Consiste en un cable trenzado dispuesto exteriormente a lo largo de la tubería, formado por conductores internos semipermeables protegidos por una trenza moldeada de material permeable que al mismo tiempo los aísla de la

tubería. Su funcionamiento consiste en hacer pasar una señal eléctrica por los conductores de manera que ésta es analizada constantemente por un microprocesador que detecta cualquier fuga en la tubería a partir de cambios de la señal eléctrica producidos por la fuga del fluido de la tubería que entra en contacto con los conductores, cambiando las propiedades eléctricas de éstos. Existen distintos tipos de cable que se adecúan a diferentes tipos de fluidos existentes como agua, hidrocarburos y ácidos.

5.2.2.2 Fotografía termográfica

Este tipo de método se basa en el hecho de que cuando se produce un escape en una tubería el fluido que se escapa tiene una temperatura y una conductividad térmica diferente del medio que rodea la tubería, sea este aire, tierra u otro. La fotografía termográfica de la tubería permite detectar estas fugas como un chorro o una protuberancia en el mapa de temperaturas. Estos métodos son utilizados fundamentalmente en tuberías enterradas.

5.2.2.3 Detección de emisiones acústicas

Se basan en la emisión de una señal acústica producida por el fluido al pasar por el orificio de la pared de la tubería cuando se produce una fuga. Precisan de la instalación de unos sensores acústicos en las paredes de la tubería los cuales registran en ausencia de fugas un patrón de ruido el cual se ve modificado cuando se produce una fuga. Pueden precisar de ajustes en la banda de frecuencias a medir, o de la instalación adicional de filtros o amplificadores según la tipología de tubería y de fluido a controlar.

5.2.2.4 Tubos sensores de vapor

Consiste en la instalación de un tubo de pequeño diámetro a lo largo de la tubería, el cual es muy permeable a las sustancias volátiles que forma el fluido que transporta la tubería. De esta forma cuando se produce una fuga los vapores producidos entran en contacto con el tubo y penetran en él, incrementándose al poco tiempo en su interior la concentración de éstos. Periódicamente se bombea el aire del interior de un tramo de tubo hacia una unidad de detección dotada de un sensor de gas que detecta la concentración de vapor determinando si se ha producido una fuga o no.

5.2.2.5 Fibra óptica

Consiste en la instalación a lo largo de la tubería de un cable de fibra óptica. Cuando se produce una fuga de fluido éste entra en contacto con el cable. La

fuga se detecta gracias a que el fluido provoca localmente un cambio en la temperatura del cable.

5.3 Estudio base del banco de pruebas

La idea básica expuesta por K. Watanabe (1) deriva de la teoría de los instrumentos de viento, y en él se demuestra que la respuesta a una onda acústica introducida en el extremo de una tubería y medida en los dos extremos opuestos de ésta debe mostrar un pico visible positivo o negativo en un cierto instante de tiempo, y que en él hay la información necesaria para determinar la localización, en el caso que exista, de una fuga en la tubería.

El método asume las siguientes simplificaciones:

- la zona de la tubería a ensayar tiene estrechada su sección en los puntos inicial y final, condición de reflejo de la onda en el tramo a ensayar
- la tubería no tiene ramificaciones, que se podrían confundir con fugas
- existe tan solo un punto de fuga en la zona de estudio, para simplificar el desarrollo teórico
- la sección de la tubería es uniforme, para simplificar el desarrollo teórico
- el valor de la presión en la entrada de la tubería en el tramo a ensayar debe tener fluctuaciones aleatorias del tipo ruido blanco
- las presiones en la zona de ensayo se miden con micrófonos con banda de frecuencia limitada, por lo que la capacidad de detección de fugas estará limitada por éstos
- las ondas acústicas se propagan en la tubería sin atenuación
- la velocidad del fluido circulante es despreciable respecto a la velocidad de propagación del sonido en el fluido

El estudio de Watanabe (1) considera el esquema de una tubería como el que se muestra en la Figura 5.1, en donde

x es la distancia desde el inicio a lo largo del eje de la tubería

L es la longitud del tramo de tubería

l^- es la longitud hasta el inicio del orificio de la fuga

l^+ es la longitud hasta después del orificio de la fuga

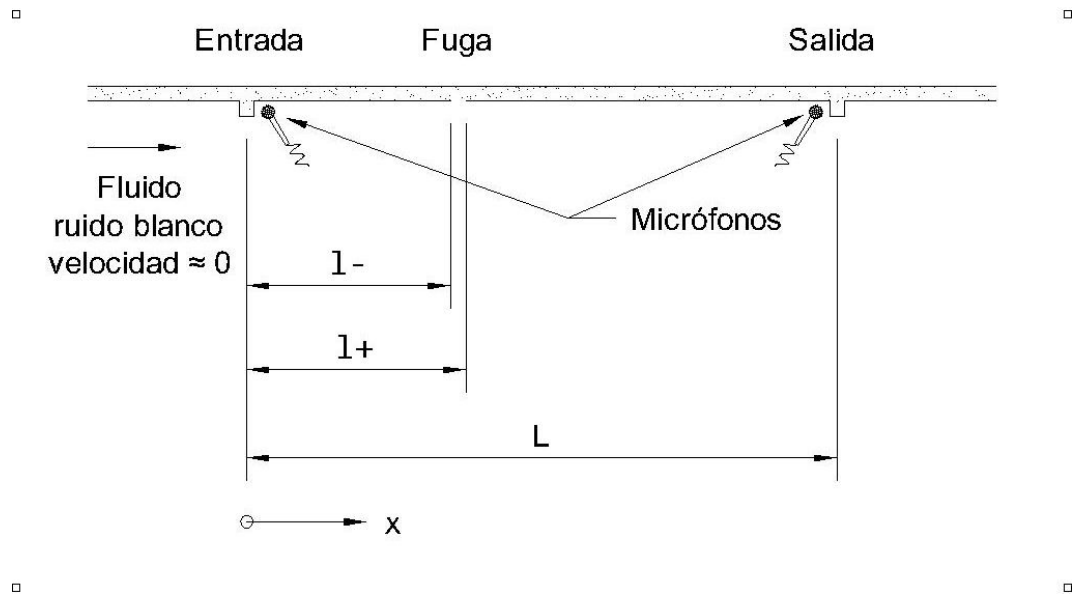


Figura 5.1. Esquema de la tubería, según Watanabe (1)

El ruido blanco que llega al tramo de tubería en estudio es registrado por los micrófonos en el inicio y final del tramo como $p_i(t) (= p(0, t))$ y $p_o(t) (= p(L, t))$ respectivamente.

La propagación de la onda de presión sin atenuación se puede describir mediante las ecuaciones de onda (5.1) a (5.4) como sigue.

$$-\frac{1}{C_f} \frac{\partial f(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial f(x, t)}{\partial x} \quad (5.1)$$

$$f(L, t) + b(L, t) = 0 \quad (5.2)$$

$$-\frac{1}{C_b} \frac{\partial b(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial b(x, t)}{\partial x} \quad (5.3)$$

$$\frac{\rho}{A} [C_f f(0, t) - C_b b(0, t)] = p_i(t) \quad (5.4)$$

Siendo

$$C_f = C_0 + v \quad (5.5)$$

$$C_b = C_0 - v \quad (5.6)$$

Donde

t es el tiempo

f es la velocidad del volumen del sonido propagándose hacia adelante

b es la velocidad del volumen del sonido propagándose hacia atrás

C_0 es la velocidad del sonido determinada por la presión y la temperatura

v es la velocidad del fluido

C_f es la velocidad total del sonido propagándose hacia adelante

C_b es la velocidad total del sonido propagándose hacia atrás

A es la sección de la tubería

ρ es la densidad del fluido

La velocidad total del volumen de sonido $u(x, t)$ y la presión del sonido $p(x, t)$ está dada por las ecuaciones (5.7) y (5.8) respectivamente.

$$u(x, t) = f(x, t) + b(x, t) \quad (5.7)$$

$$p(x, t) = \frac{\rho}{A} [C_f f(x, t) - C_b b(x, t)] \quad (5.8)$$

Considerando las tres partes del dominio siguientes ($0 \leq x < l^-$, $l^- \leq x < l^+$, $l^+ \leq x \leq L$) y asumiendo que $l^+ \cong l^- \cong l$, aplicando la transformada de Fourier con respecto al tiempo a las ecuaciones de onda (5.1) a (5.4) y sustituyendo las transformadas de Fourier de $f(x, t)$ y $b(x, t)$ en las ecuaciones (5.7) y (5.8) en cada uno de los dominios, tenemos lo siguiente.

En el dominio $0 \leq x < l^-$ se llega a la ecuación (5.9)

$$\begin{pmatrix} P(l^-, i\omega) \\ U(l^-, i\omega) \end{pmatrix} = F(l^-) \begin{pmatrix} P(0, i\omega) \\ U(0, i\omega) \end{pmatrix} \quad (5.9)$$

De la misma manera para el dominio $l^+ \leq x \leq L$ se llega la ecuación (5.10).

$$\begin{pmatrix} P(L, i\omega) \\ U(L, i\omega) \end{pmatrix} = F(L - l^+) \begin{pmatrix} P(l^+, i\omega) \\ U(l^+, i\omega) \end{pmatrix} \quad (5.10)$$

Donde $P(x, i\omega)$ y $U(x, i\omega)$ son las transformadas de Fourier de $p(x, t)$ y de $u(x, t)$ respectivamente, y $F(z)$ es la matriz de transferencia definida por la ecuación (5.11)

$$F(z) = \exp(i\omega z/v') \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{pmatrix} \quad (5.11)$$

Siendo los coeficientes e_{ij} los siguientes

$$e_{11} = \cos\left(\frac{\omega z}{C'}\right) - i\left(\frac{v}{C_0}\right) \sin\left(\frac{\omega z}{C'}\right) \quad (5.12)$$

$$e_{12} = -i\frac{\rho C_0}{A} \left(1 - \left(\frac{v}{C_0}\right)^2\right) \sin\left(\frac{\omega z}{C'}\right) \quad (5.13)$$

$$e_{21} = -i\frac{\rho C_0}{A} \sin\left(\frac{\omega z}{C'}\right) \quad (5.14)$$

$$e_{22} = \cos\left(\frac{\omega z}{C_0}\right) + i\left(\frac{C_0}{v}\right) \sin\left(\frac{\omega z}{C'}\right) \quad (5.15)$$

Donde ω es la frecuencia angular, y

$$i = \sqrt{-1} \quad (5.16)$$

$$v' = v \left[\left(\frac{C_0}{v}\right)^2 - 1 \right] \quad (5.17)$$

$$C' = C_0 \left[1 - \left(\frac{v}{C_0}\right)^2 \right] \quad (5.18)$$

Y para el dominio $l^- \leq x < l^+$ se llega a la ecuación (5.19)

$$\begin{pmatrix} P(l^+, i\omega) \\ U(l^+, i\omega) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/Z_l & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} P(l^-, i\omega) \\ U(l^-, i\omega) \end{pmatrix} \quad (5.19)$$

Donde a Z_l se le llama la impedancia acústica radiacional de la fuga, dada por Ohizumi (3) según la ecuación (5.20)

$$Z_l = \frac{i\omega \frac{8\rho}{3\pi\sqrt{\pi d \tilde{k}}}}{1 + i\omega \left(\frac{3\sqrt{d\pi}}{16C_0} \right)} \quad (5.20)$$

Siendo d el área de la sección de la fuga asumiendo que ésta es un círculo, y siendo \tilde{k} el coeficiente de compensación.

Para frecuencias en el rango de $0 \leq \omega \ll 16C_0/3\sqrt{\pi d}$ la ecuación (5.20) de la impedancia se puede aproximar por

$$Z_l \cong i\omega \frac{8\rho}{3\pi\sqrt{\pi d \tilde{k}}} \quad (5.21)$$

Sustituyendo las ecuaciones (5.9) y (5.19) en la ecuación (5.10) se llega a la expresión

$$\begin{pmatrix} P(L, i\omega) \\ U(L, i\omega) \end{pmatrix} = F(L - l^+) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/Z_l & 1 \end{bmatrix} F(l^-) \begin{pmatrix} P(0, i\omega) \\ U(0, i\omega) \end{pmatrix} \quad (5.22)$$

que se puede reescribir como

$$\begin{pmatrix} P(L, i\omega) \\ U(L, i\omega) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} P(0, i\omega) \\ U(0, i\omega) \end{pmatrix} \quad (5.23)$$

De las simplificaciones que asume el método, expuestas al inicio, atendiendo a que en su punto inicial y final del tramo la tubería tiene estrechada su sección, concretamente para $x = L$, y a partir de la ecuación (5.7) y la condición de contorno dada por (5.2) se deduce que

$$U(L, i\omega) \cong 0 \quad (5.24)$$

Aplicando (5.24) a la ecuación (5.23) y operando obtenemos la función de transferencia que relaciona $P(0, i\omega)$ con $P(L, i\omega)$, que es

$$\frac{P(0, i\omega)}{P(L, i\omega)} = f_{22} = G(i\omega) \quad (5.25)$$

Desarrollando el término f_{22} la función de transferencia queda así

$$\begin{aligned}
 G(i\omega) = \exp(i\omega L/v') \left\{ \left[1 + \frac{\rho v}{2Z_l A} \left(1 - \left(\frac{v}{C_0} \right)^2 \right) \right] \cos \frac{\omega L}{C'} \right. \\
 + i \left[\frac{v}{C_0} + \frac{\rho v}{2Z_l A} \left(1 - \left(\frac{v}{C_0} \right)^2 \right) \right] \sin \frac{\omega L}{C'} \\
 + i \frac{\rho C_0}{2Z_l A} \left(1 - \left(\frac{v}{C_0} \right)^2 \right) \sin \frac{\omega(2l-L)}{C'} \\
 \left. - \frac{\rho v}{2Z_l A} \left(1 - \left(\frac{v}{C_0} \right)^2 \right) \cos \frac{\omega(2l-L)}{C'} \right\}
 \end{aligned} \quad (5.26)$$

Finalmente, considerando la simplificación inicial consistente en que la velocidad del fluido es despreciable frente a la de propagación del sonido en él, es decir $v \cong 0$ y por tanto $v' \rightarrow \infty$ y $C' \cong C_0$, y considerando la aproximación de la impedancia dada por (5.21), entonces la función de transferencia queda así

$$G(i\omega) \cong G(\omega) = \cos \frac{\omega L}{C_0} + \frac{3\pi\sqrt{\pi d} \tilde{k} C_0}{16A\omega} \left(\sin \frac{\omega L}{C_0} - \sin \frac{\omega(2l-L)}{C_0} \right) \quad (5.27)$$

Definiendo la constante K_W determinada por la sección transversal del orificio de la fuga de la siguiente manera

$$K_W = \frac{3\pi\sqrt{\pi d} \tilde{k} C_0}{16A} \quad (5.28)$$

Se puede reescribir (5.27) de la forma

$$G(\omega) = \cos \frac{\omega L}{C_0} + \frac{K_W}{\omega} \sin \frac{\omega L}{C_0} - \frac{K_W}{\omega} \sin \frac{\omega(2l-L)}{C_0} \quad (5.29)$$

De esta manera la función de transferencia se expresa como suma de tres términos, que llamaremos $G_1(\omega)$, $G_2(\omega)$ y $G_3(\omega)$ respectivamente. De ellos es el último término el que contiene la información de la localización del punto de fuga en la tubería, dado que es el único dependiente de la distancia l . Concretamente el periodo $2\pi C_0/|2l-L|$ del término $G_3(\omega)$, que es el periodo mayor de los tres términos de $G(\omega)$, es el que da esta información.

La representación gráfica de estos tres términos puede observarse en las Figura 5.2, Figura 5.3 y Figura 5.4.

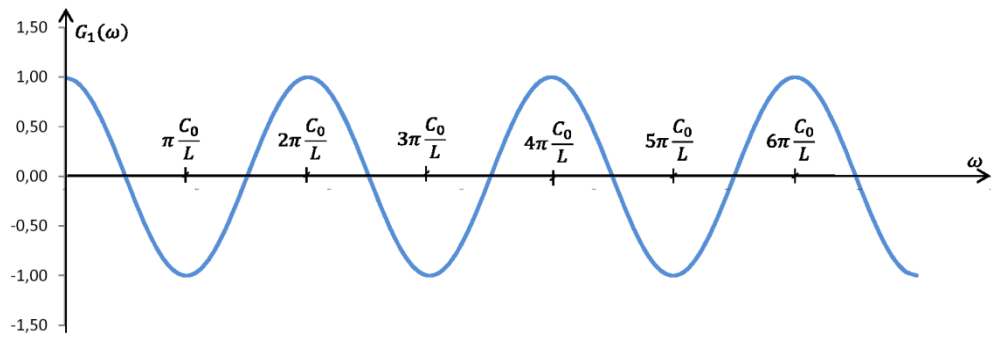


Figura 5.2. Término $G_1(\omega)$ de la función de transferencia de Watanabe (1)

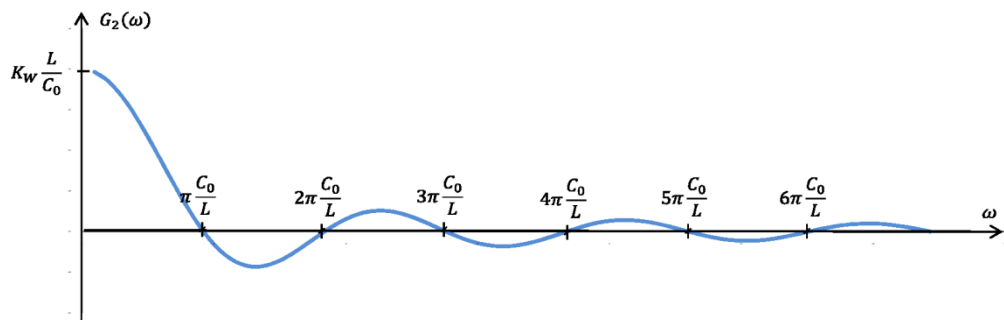


Figura 5.3. Término $G_2(\omega)$ de la función de transferencia de Watanabe (1)

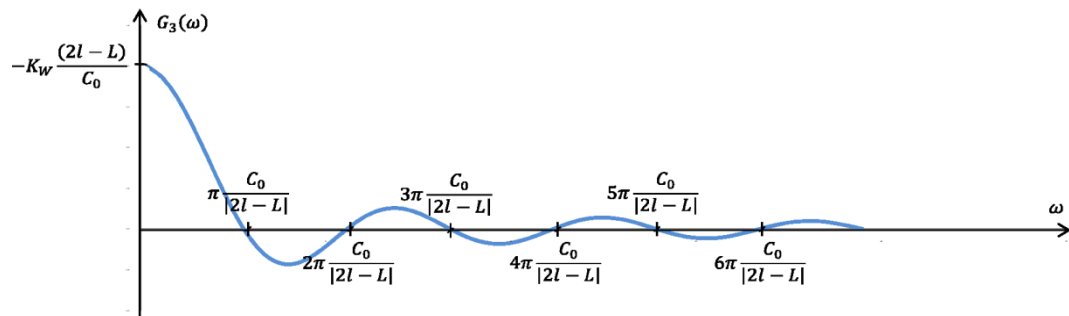


Figura 5.4. Término $G_3(\omega)$ de la función de transferencia de Watanabe (1)

En cambio, en la representación de la función de transferencia completa $G(\omega)$, que se muestra en la Figura 5.5, no se infiere a simple vista relación con la distancia l a la que se localiza la fuga. Esta función de transferencia dada por la ecuación (5.29) es una función real formada por funciones periódicas y periódicas amortiguadas de la frecuencia ω .(5.29)

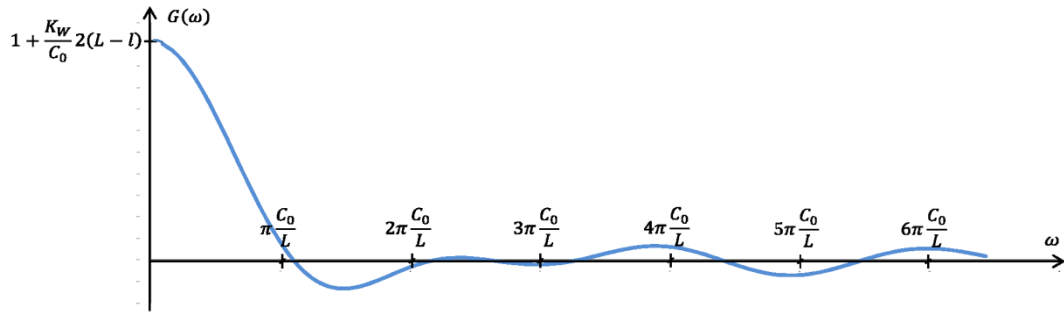


Figura 5.5. Función de transferencia $G(\omega)$ de Watanabe (1)

En este punto de lo expuesto la formulación presenta los dos siguientes inconvenientes según K. Watanabe (1). El primero la dificultad de aislar la información del último término $G_3(\omega)$ de la función de transferencia $G(\omega)$ que contiene la frecuencia total de respuesta. El segundo es que la función de transferencia $G_3(\omega)$ se estima a partir del cociente de las transformadas de Fourier de dos señales $p_i(t)$ y $p_o(t)$ medidas en la realidad con micrófonos y que, por tanto, pueden estar contaminadas con ruido. Todo ello puede llevar a la estimación incorrecta del periodo $2\pi C_0/|2l - L|$ y del signo del término $G_3(\omega)$ y, en consecuencia, a la incorrecta localización de la fuga.

Dado que $G(\omega)$ es función real según la ecuación (5.27), K. Watanabe (1) propone aplicar la transformada inversa coseno de Fourier a la función de transferencia $G(\omega)$ en vez de la transformada inversa de Fourier, e integrar en la banda de frecuencias $\omega_l \leq \omega \leq \omega_h$ en que los micrófonos utilizados pueden operar y realizar lecturas según lo asumido al inicio del estudio, obteniendo de esta manera la función $g(t)$ dada por la ecuación (5.30), que desarrollada por términos da como resultado la ecuación (5.31).

$$g(t) = \frac{2}{\pi} \int_{\omega_l}^{\omega_h} G(i\omega) \cos \omega t d\omega \quad (5.30)$$

$$\begin{aligned} g(t) &= \frac{2}{\pi} \int_{\omega_l}^{\omega_h} \cos \frac{\omega L}{C_0} \cos \omega t d\omega + \frac{2K_w}{\pi} \int_{\omega_l}^{\omega_h} \frac{\sin \frac{\omega L}{C_0} \cos \omega t}{\omega} d\omega \\ &\quad - \frac{2K_w}{\pi} \int_{\omega_l}^{\omega_h} \frac{\sin \frac{\omega(2l - L)}{C_0} \cos \omega t}{\omega} d\omega \\ &= g_1(t) + g_2(t) + g_3(t) \end{aligned} \quad (5.31)$$

K. Watanabe (1) realiza un análisis gráfico de las funciones $g_1(t)$, $g_2(t)$ y $g_3(t)$ obtenidas y observa que $g_1(t)$ y $g_2(t)$ muestran un fuerte pico positivo en el instante $t_L = L/C_0$ correspondiente con el tiempo que tarda el sonido en recorrer la zona de ensayo del longitud L , mientras que $g_3(t)$ muestra un fuerte pico positivo o negativo en el instante $t_l = |2l - L|/C_0$.

Concretamente si $l \leq L/2$ entonces $g_3(t)$ se puede reescribir por ser función impar como

$$g_3(t) = -\frac{K_w}{\omega} \sin \frac{\omega(2l - L)}{C_0} = \frac{K_w}{\omega} \sin \frac{\omega(L - 2l)}{C_0} \quad (5.32)$$

Por lo que la transformada inversa coseno de Fourier tiene un pico negativo en el instante dado por la ecuación (5.33)

$$t_l = \frac{L - 2l}{C_0} \quad (5.33)$$

De la que, aislando la distancia l , se obtiene

$$l = \frac{1}{2}(L - C_0 t_l) \quad (5.34)$$

Por tanto de la ecuación (5.34) se puede determinar la distancia l a la que existe una fuga cuando $g(t)$ tiene un pico negativo en el instante $t = t_l \neq t_L$.

Análogamente cuando $g(t)$ tiene un pico positivo en el instante $t = t_l$ la fuga se encontrará a una distancia l dada por la ecuación

$$l = \frac{1}{2}(L + C_0 t_l) \quad (5.35)$$

Y en este caso será $l \geq L/2$.

En la Figura 5.6 se muestra la representación aproximada de $g(t)$ cuando la tubería presenta una fuga en un punto a una distancia $l_1 < L/2$, mientras que en la Figura 5.7 el caso corresponde a una distancia $l_2 > L/2$ desde el inicio del tramo.

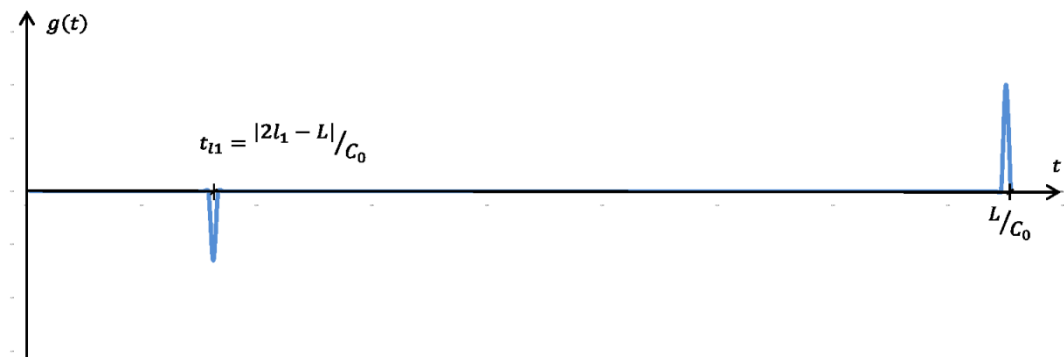


Figura 5.6. Función $g(t)$ cuando existe una fuga en $l_1 < L/2$

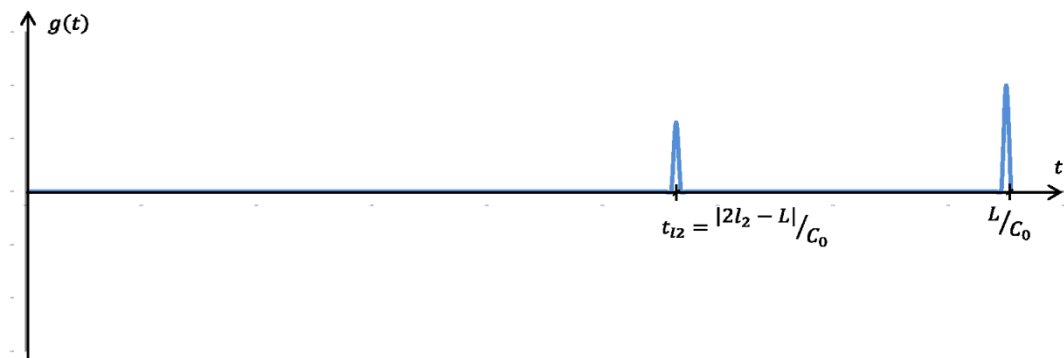


Figura 5.7. Función $g(t)$ cuando existe una fuga en $l_2 > L/2$

En la Tabla 5.1 se resumen las conclusiones del estudio de K. Watanabe (1).

Signo del pico que presenta $g(t)$ en el instante t_l	Distancia l a la que se localiza la fuga
si $g(t_l) > 0$	$l = \frac{1}{2}(L + C_0 t_l)$
si $g(t_l) < 0$	$l = \frac{1}{2}(L - C_0 t_l)$

Tabla 5.1. Resumen de la localización de fugas según Watanabe

Para la utilización en la práctica del método descrito, se requiere el muestreo discreto de las presiones al inicio y final de la tubería. Por tanto la consideración del tiempo discreto y de la frecuencia discreta se hace necesaria. La respuesta $G(\omega)$ en frecuencia discreta y la respuesta $g(t)$ en tiempo discreto se obtienen aplicando análisis de Fourier. Por tanto se deben utilizar los datos discretos medidos de $p_i(t)$ y $p_o(t)$, la transformada discreta de Fourier (DFT) y la transformada discreta inversa de Fourier ($IDFT$), en lugar de la formulación en el dominio continuo expuesto hasta ahora. El algoritmo que se deberá utilizar para ello es el Fast Fourier Transform (FFT). El procedimiento es el siguiente. En primer lugar se calcula

$$\tilde{G}(m) = \frac{DFT(p_i(k))}{DFT(p_o(k))} \quad (5.36)$$

Donde m es la frecuencia angular discreta y k el tiempo discreto, función del número de muestras y del intervalo de tiempo de muestreo.

Luego se obtiene

$$\begin{aligned} \bar{G}(m) = \frac{1}{429} [& -36 (\tilde{G}(m-5) + \tilde{G}(m+5)) \\ & + 9 (\tilde{G}(m-4) + \tilde{G}(m+4)) \\ & + 44 (\tilde{G}(m-3) + \tilde{G}(m+3)) \\ & + 69 (\tilde{G}(m-2) + \tilde{G}(m+2)) \\ & + 84 (\tilde{G}(m-1) + \tilde{G}(m+1)) + 89 (\tilde{G}(m))] \end{aligned} \quad (5.37)$$

Y se calcula

$$\hat{G}(m) = \begin{cases} \tilde{G}(m) & \text{si } |\tilde{G}(m)| > 2|\bar{G}(m)| \\ \bar{G}(m) & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (5.38)$$

El objetivo de esto es evitar los efectos de dividir por un valor muy pequeño de $DFT(p_o(k))$ en la ecuación (5.36). De la ecuación que define a $G(i\omega)$ se observa que ésta es acotada, por lo que $\tilde{G}(m)$ no puede tener un valor elevado en forma de pulso debido a una división por cero. Por tanto, la ecuación (5.38) se utiliza para evitar esa situación. Posteriormente, con $\hat{G}(m)$ se calcula $g(k)$ como la transformada inversa coseno de Fourier. Dado que, como se demostró, $G(i\omega)$ es una función real, entonces se puede calcular $g(k)$ como la transformada inversa discreta de Fourier de la parte real de $\hat{G}(m)$, es decir

$$g(k) = IDFT[Re\{\hat{G}(m)\} + i0] \quad (5.39)$$

5.4 Banco de pruebas preexistente

5.4.1 Descripción

La instalación preexistente, de la que se parte en el trabajo realizado, consiste en

- tubería de cobre
- bloques prismáticos en cobre, perforados, instalados en la tubería
- tapones con rosca
- racor de enlace de tubo de cobre a enchufe rápido para tubo de neumática de polietileno, instalado en la entrada
- llave de bola, instalada en la salida

La tubería de cobre es de una longitud total de 20 metros, de sección circular de 14 milímetros de diámetro interior y espesor de pared de 1 milímetro. Su eje sigue el trazado de una hélice cilíndrica de paso 9 centímetros, siendo el diámetro del cilindro base de 75 centímetros.

La instalación dispone de 8 pares de orificios roscados mecanizados (16 orificios en total), diametralmente encarados uno al otro respecto a la sección transversal del tubo, repartidos a lo largo de la longitud. El objetivo de estos es poder acoplar en ellos los instrumentos de medida que eventualmente se requiera disponer como pueden ser sensores de presión, caudalímetros, etc., o bien para la simulación de una fuga controlada en la tubería. La materialización de estos orificios se consigue mediante la instalación de un bloque de cobre macizo de dimensiones 52x29x25 milímetros, como el de la Figura 5.8.

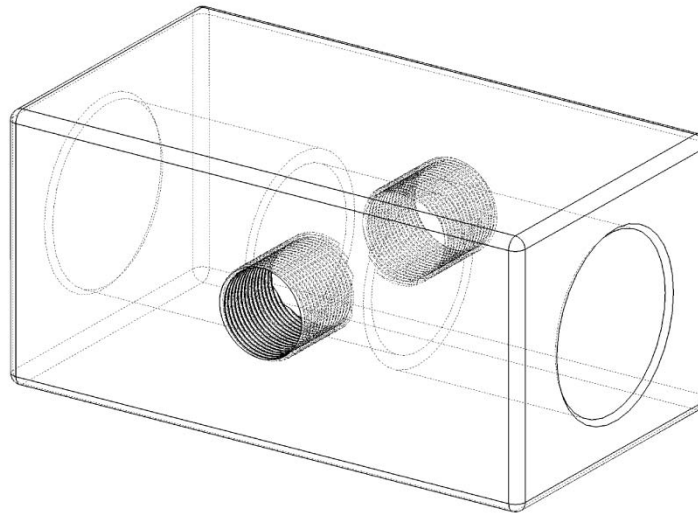


Figura 5.8. Croquis del bloque con los orificios

Estos bloques se encuentran perforados longitudinalmente con un diámetro igual al diámetro interior de la tubería y soldados por capilaridad a ésta en sus extremos en donde la perforación permite un enlace macho-hembra con la tubería. Los pares de orificios roscados son perpendiculares a la perforación longitudinal y se encuentran enfrentados. Además se cuenta con una serie de tapones roscados que permiten tapar los orificios que no sean necesarios utilizar, de una longitud tal que no interfieren el paso de flujo por la tubería.

En la entrada de la tubería existe un racor de enlace del tubo de cobre a tubo de polietileno para neumática, que permite conectar la tubería a un depósito acumulador que suministra el aire a presión necesario para los ensayos. En la salida existe una llave de bola para poder cerrar parcialmente el flujo en la salida.

La instalación consistente en la tubería más los bloques con los orificios referenciados se muestra en la Figura 5.9.

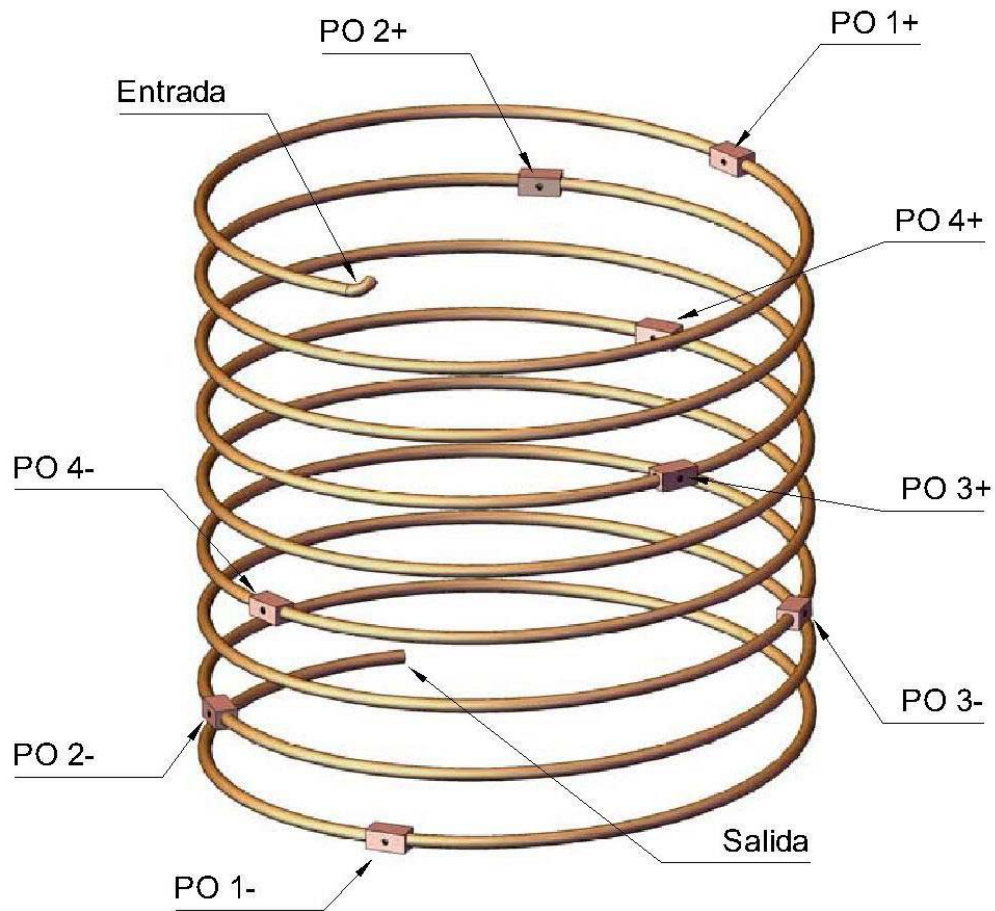


Figura 5.9. Croquis de la instalación preexistente

5.4.2 Parámetros de diseño

Los parámetros de diseño que se tuvieron en cuenta cuando se realizó esta instalación pre-existente fueron

- el diámetro interior del tubo
- el radio de curvatura del cilindro que sirve de base para la hélice cilíndrica del trazado de la tubería
- la longitud total de la tubería
- el paso de la hélice cilíndrica que sigue el trazado
- la distancia entre pares de orificios
- el número de pares de orificios

5.4.2.1 *Diámetro interior*

La elección del diámetro interior del tubo estuvo condicionada por la disponibilidad del tubo comercial y por ser la relación entre el radio de la sección de tubería y el radio de curvatura del trazado de ésta, conocida como parámetro de curvatura adimensional ε , un parámetro a considerar para evitar el efecto del choque de la onda de presión con las paredes del tubo cuando se propaga a lo largo de la tubería. Este rebote produce una perturbación en las presiones y distorsionaría las lecturas, efecto que no está considerado en el modelo teórico presentado. Para valores del parámetro de curvatura ε inferiores a 0.02 se puede considerar menospreciable este fenómeno. El radio de la sección de tubería instalada es de 7 milímetros y el radio de curvatura de la hélice cilíndrica del trazado es de 375 milímetros, por lo que el valor del parámetro de curvatura ε del trazado es de 0.019, con lo que se consigue evitar la perturbación asociada a este fenómeno sobre la onda de presión.

5.4.2.2 *Radio de curvatura del trazado*

La elección del radio de curvatura del trazado y sus condicionantes se han descrito ya en el apartado 5.4.2.1 por estar relacionado éste con el diámetro interior de la tubería.

5.4.2.3 *Longitud total de la tubería*

La elección de la longitud total de la tubería vino condicionada en primer lugar por el volumen total de la instalación, considerando la curvatura del trazado y el paso de la hélice. El volumen final interesaba que fuese transportable por una persona.

En segundo lugar debía respetarse el efecto que tiene la longitud de la tubería en el estudio teórico realizado por K. Watanabe (1). Éste afirma que de la observación de las ecuaciones (5.34) y (5.35) que relacionan la distancia desde el origen de la fuga y el tiempo para el cual ocurre el pulso en la función $g(t)$ se llega a la conclusión que la mínima resolución para la identificación del punto de fuga viene determinado por el período de muestreo τ de las señales $p_i(t)$ y $p_o(t)$ a través de la ecuación

$$\Delta x = \frac{\tau_m C_0}{2} \quad (5.40)$$

En donde Δx es la resolución mínima en la localización de la fuga y τ_m el intervalo de tiempo de muestreo. Para el caso de una velocidad de propagación

del sonido en el fluido C_0 de 344 m/s y un intervalo de tiempo de muestreo τ_m de $1.0e-3$ segundos, se obtendría una resolución mínima Δx de 0.172 metros.

En tercer lugar, del mismo estudio de K. Watanabe (1) que afirma que del análisis de la magnitud del término $G_3(i\omega)$ se concluye que para una fuga fija a una distancia l , la identificación y localización de la fuga se hace tanto más difícil cuanto menor sea la longitud total de la tubería, por ser el ancho de banda de las frecuencias del ruido blanco necesario para el ensayo mayores y por necesitarse, en consecuencia, unos sensores de presión con un rango más amplio de frecuencias a detectar y por tanto más costosos.

Con todo ello se decidió que la resolución mínima Δx fuese aproximadamente del 1% de la longitud total de la tubería. Por tanto una longitud de 20 metros. Esto conduce a un rango de frecuencias, tanto para el ruido blanco a generar como para los sensores de presión a detectar, de

$$0 \leq \omega \leq \omega_m \quad (5.41)$$

Siendo ω_m la frecuencia angular efectiva máxima dada por

$$\omega_m \geq \frac{56.7\pi C_0}{L} \quad (5.42)$$

Para una velocidad C_0 de 344 m/s y una longitud L de 20 metros, necesitaríamos generar y poder leer con los sensores un rango de frecuencias angulares, dado por (5.42) y (5.43), de

$$0 \leq \omega \leq 3064 \text{ rad/s} \quad (5.43)$$

Lo cual requiere una frecuencia de muestreo, dada por el teorema de Nyquist véase apartado 6.1, de

$$f_M > 2f_h \leq 2 \cdot \frac{\omega_h}{2\pi} = \frac{3064 \text{ rad/s}}{\pi \text{ rad}} = 976 \text{ Hz} \quad (5.44)$$

Esto hace necesario un intervalo de tiempo de muestreo máximo t_M dado por

$$t_M = \frac{1}{f_M} < \frac{1}{976 \text{ Hz}} = 0.00103 \text{ s} = 1.03 \text{ milisegundos} \quad (5.45)$$

Lo cual se deberá conseguir con la instrumentación y dispositivo de adquisición de datos que se disponga.

5.4.2.4 Paso de la hélice del trazado

El paso de la hélice cilíndrica del trazado debe ser suficiente como para permitir el montaje de la instrumentación, como sensores de presión y caudalímetros, en los orificios roscados dispuestos en los bloques. Se tomó un paso de hélice de 9 centímetros.

5.4.2.5 Distancia entre pares de orificios

Cuando una onda longitudinal de presión se propaga a lo largo de una tubería, la interferencia de la onda y de su reflejada con el final de la tubería da lugar a una onda estacionaria. La onda estacionaria no es en sí una onda de propagación sino que se trata de los distintos modos de vibración de la presión del fluido, los cuales sólo se producen para determinadas frecuencias llamadas frecuencias de resonancia, la más baja de ellas la fundamental y el resto múltiplos de la fundamental. Una onda estacionaria de presión así formada, la presión relativa se anula en ciertos puntos llamados nodos.

La lectura de las presiones en estos nodos conllevaría la pérdida de información de la onda de presión generadora, por lo que la ubicación de los sensores, y por tanto de los bloques con los orificios, en estos nodos debe evitarse.

Los nodos de una onda estacionaria se forman en fracciones exactas de la longitud total L . Dado que una fracción exacta es un número racional y sabiendo que ningún número racional es normal, se escogieron entonces las distancias l_j tales que la relación l_j/L fuese un número normal. Para ello se tomaron los valores siguientes: $x_1 = 1$, $x_2 = 1.6$, $x_3 = 2.5$, $x_4 = 4$, $x_5 = 6.3$. Se cumple que con ellos así definidos, los siguientes cocientes

$$\frac{\sum_{i=1}^j x_i}{\sum_{i=1}^5 x_i} \quad (5.46)$$

no son una fracción exacta, para $j = 1, 2, 3, 4$.

Por tanto, las distancias dados por

$$l_j = L \cdot \frac{\sum_{i=1}^j x_i}{\sum_{i=1}^5 x_i} \quad (5.47)$$

tampoco son una fracción exacta de L , para $j = 1, 2, 3, 4$.

De esta manera, y tomando como origen el inicio de la tubería, las distancias l_j (con $j = 1, 2, 3, 4$) definen cuatro localizaciones de los bloques con los orificios.

Las otras cuatro localizaciones se fijan tomando como origen el final de la tubería, es decir $(L - l_j)$. De esta manera la distribución de orificios es simétrica respecto de la mitad de la tubería. En la Tabla 5.2 se resumen los cálculos que se efectuaron para los valores x_j fijados y siendo $L = 20$ la longitud de la tubería del banco de pruebas.

j	x_j	$\sum x_i (i=1,...,j)$	$\frac{\sum x_i (i=1,...,j)}{\sum x_i (i=1,...,5)}$	$l_j = L \cdot \frac{\sum x_i (i=1,...,j)}{\sum x_i (i=1,...,5)} (*)$	$L - l_j (*)$
1	1,00	1,00	0,06493...	1,29...	18,70...
2	1,60	2,60	0,16883...	3,37...	16,62...
3	2,50	5,10	0,33116...	6,62...	13,37...
4	4,00	9,10	0,59090...	11,81...	8,18...
5	6,30	15,40	1,00	20,00	0,00

(*) Distancias en metros. Longitud de la tubería $L = 20$ metros

Tabla 5.2. Cálculo de la ubicación de los pares de orificios

En la Tabla 5.3 se relaciona la nomenclatura de pares de orificios utilizada, mostrada en la Figura 5.9, con la ubicación desde el inicio de la tubería del banco de pruebas.

Nomenclatura del par de orificios	j	Distancia desde el inicio [m]	
		l_j	$L - l_j$
PO 1+	1	1,29	8,18
PO 2+	2	3,37	
PO 3+	3	6,62	
PO 4+	4		
PO 4-	4	11,81	13,37
PO 3-	3		
PO 2-	2		
PO 1-	1		

Para una longitud de la tubería $L = 20$ metros

Tabla 5.3. Nomenclatura de pares de orificios y ubicación

5.4.2.6 *Número de pares de orificios*

El número de pares de orificios dispuestos a lo largo de la tubería quedó determinado por la longitud total de la tubería y las distancias entre pares de orificios calculadas en el apartado anterior. El número de pares de orificios final es de 8.

6 PLANTEAMIENTO

6.1 Introducción

A partir de los antecedentes expuestos se plantea acabar de diseñar el banco de pruebas y finalizar su instalación para poder llevar a cabo los experimentos de localización y detección de fugas. Por tanto en el planteamiento se requiere definir primero la instrumentación del banco de pruebas y segundo los ensayos a realizar.

6.2 Instrumentación

Según (4) se entiende por instrumentación el conjunto de elementos que sirven para medir, convertir, controlar o registrar variables de un proceso que tienen lugar en un sistema, que en este caso es la tubería del banco de pruebas. Estos elementos necesarios son

- Instrumentos de control
- Instrumentos de medición
- Tarjeta de adquisición de datos
- Filtro analógico, si es necesario
- Ordenador
- Software específico

Un instrumento de control es un dispositivo capaz de cambiar un parámetro (caudal, presión,...) del sistema sobre el que actúa.

Un instrumento de medición o sensor, es un dispositivo que transforma una variable física de interés, o variable de medida, a una forma apropiada para registrarla llamada señal de medida, la cual es analógica y contiene la información de la medición en términos de tensión, de corriente, de frecuencia u otros.

Los sensores pueden clasificarse en activos o pasivos dependiendo de si son capaces de generar su propia energía para funcionar. Entre los pasivos se pueden encontrar resistivos, capacitivos o inductivos en función de si para detectar la variación de la magnitud a medir utilizan una resistencia eléctrica, la variación de la capacidad de un condensador o la variación de la inductancia de una bobina, respectivamente. El rango de un sensor es el valor máximo y mínimo de ciertas variables físicas que afectan a éste, que pueden ser o no de medida, entre los cuales el sensor funciona bajo las especificaciones dadas por el fabricante.

La señal de salida de un sensor no siempre es válida para su procesado y puede requerir de un amplificador para adaptar su nivel a los del resto de señales. Ciertos sensores, como los capacitivos, no dan la información de la medida en términos de tensión de la señal de salida sino en términos de corriente por lo que se necesita un convertidor de corriente-tensión. Posteriormente la señal analógica, ya en términos de tensión obtenida del sensor, requiere ser digitalizada para poder ser tratada por un ordenador. El proceso de acondicionamiento de la señal y digitalización lo realiza la tarjeta de adquisición de datos. En algunas aplicaciones, además, puede ser necesario para el acondicionamiento de la señal el uso de filtros externos para reducir el nivel de ruido.

La digitalización o conversión analógica-digital, véase(5), consiste en las tres etapas mostradas en la Figura 6.1, llamadas muestreo, cuantificación digital y codificación.

El muestreo consiste en la lectura discreta de una señal analógica cada cierto intervalo de tiempo, llamado intervalo de tiempo de muestreo t_M , o de manera inversa frecuencia de muestreo f_M . Según el teorema de muestreo de Nyquist, véase (6), para que una señal analógica muestreada pueda posteriormente ser reconstruida de forma exacta se requiere que la frecuencia de muestreo de la señal f_M cumpla lo siguiente

$$f_M > 2f_h \quad (6.1)$$

Donde f_h es la frecuencia máxima de la señal muestreada que se podrá posteriormente reconstituir.

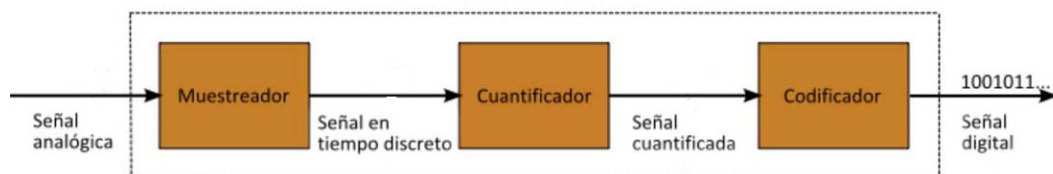


Figura 6.1. Conversión analógica-digital, según (5)

La cuantificación digital consiste en asignar a los valores de la señal digital discreta los valores más cercanos correspondientes con ciertos niveles, llamados niveles de cuantificación, los cuales vienen determinados por el número de niveles en código binario que el codificador puede representar. Una vez realizada dicha cuantificación digital al nivel de bits disponibles en la tarjeta, ésta es irreversible en cuanto a la pérdida de información.

La resolución de una tarjeta de adquisición de datos es el parámetro que informa del número de bits que utiliza para la etapa de cuantificación digital, y es un parámetro a tener en cuenta tanto para acotar el error debido a dicha conversión, cuyo valor será la mitad del intervalo entre niveles. También determina la amplitud de pico a pico mínima que puede tener una señal oscilante analógica, de entrada o de salida, para que no sea interpretada como continua.

Las señales digitalizadas son posteriormente procesadas por un ordenador o en casos complejos por un procesador. Cuando se utiliza un ordenador para su procesamiento, éste se realiza mediante lo que se conoce como instrumento virtual. Un instrumento virtual utiliza tanto hardware como software para llevar a cabo la adquisición de datos y al mismo tiempo permite controlar el proceso que se lleva a cabo sobre el sistema mediante la actuación sobre los instrumentos de control. A diferencia de los instrumentos clásicos basados únicamente en hardware, como puede ser un osciloscopio, un instrumento virtual permite al usuario crear y definir de manera personalizada cómo controla, adquiere, procesa y almacena los datos relacionados con el proceso que afecta al sistema.

El instrumento virtual requiere, además del procesador u ordenador mencionado en el cual se ejecuta, de un software que permite tanto el diseño del instrumento virtual como la comunicación con los dispositivos para configurarlos y obtener de ellos las señales de las medidas. La plataforma de desarrollo *LabView®*, creada por *National Instruments®*, es un ejemplo de software que permite el desarrollo y la ejecución de instrumentación virtual.

6.3 Puntos a definir en el banco de pruebas

Los aspectos que se deben definir se agrupan en los referidos a instrumentación y en los de definición de los ensayos a realizar.

En cuanto a instrumentación se debe resolver lo siguiente

- A. Cómo controlar, en la entrada de la tubería del banco de pruebas, el caudal de forma que genere un rizado en la presión del fluido en la entrada, que como se ha expuesto en el apartado 5.3 es necesario para localizar las fugas. Debe ser capaz también de modificar el caudal permitiendo entradas con forma de escalón para el estudio de transitorios.

- B. Cómo realizar lecturas de presión en el inicio y en el final de la tubería en el rango de frecuencias de interés expuesto en el apartado 5.3.
- C. Cómo controlar y medir el caudal en el punto de la fuga.
- D. La adquisición de datos.
- E. El filtrado analógico que puedan requerir determinadas señales.
- F. Cómo integrar el control de los parámetros de ensayo y el proceso de adquisición de datos.

La solución y justificación de estos puntos se expone en el apartado 7.1, 7.2 y 7.3.

En cuanto a los ensayos a realizar en el banco de pruebas se debe

- H. Definir los ensayos a llevar a cabo.
- I. Obtener los datos de los ensayos, procesarlos según el modelo teórico en que se fundamentan y obtener los resultados experimentales.
- J. Comprobar que los resultados experimentales se ajustan a los resultados teóricos esperados

La solución y justificación de estos puntos se expone en el apartado 7.4.

En este punto también hay que definir el fluido con el que se realizarán los ensayos y que condicionan a la instrumentación y la instalación. Por simplicidad, seguridad y disponibilidad en el laboratorio se fija que el fluido del ensayo sea aire seco a presión.

Los resultados se exponen en el apartado 8.

7 SELECCIÓN DE LA SOLUCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

7.1 Instrumentación instalada

7.1.1 Electroválvula de control del caudal de entrada

Con la electroválvula de control de entrada a la tubería se resuelve el punto A. del apartado 6.3. Se instaló el modelo *PX8619E3C2KK* de *Matrix®* que es una electroválvula de tipo solenoide de dos vías para aire y gases neutros, cuya sección extraída de (7) se muestra en la Figura 7.1, formada por un solo cuerpo y 9 obturadores con un tiempo de respuesta tanto para apertura como para cierre de menos de 1 ms, que permite frecuencias máximas de 500 Hz en un rango de presiones de trabajo de 0 a 6 bar.

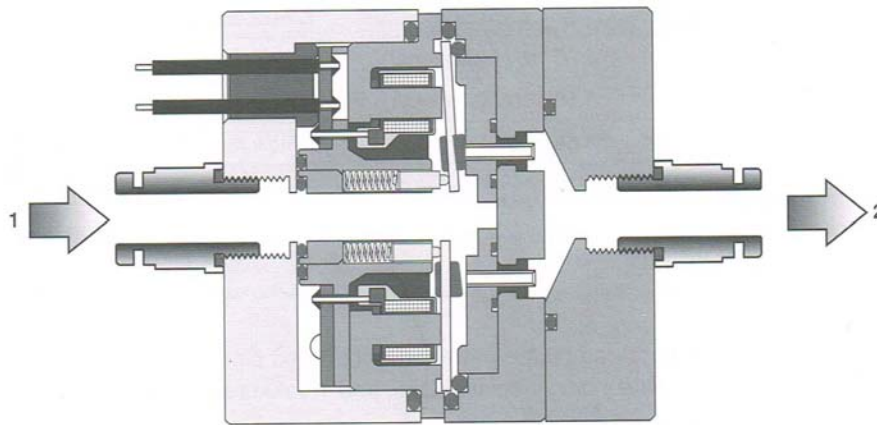


Figura 7.1. Sección electroválvula serie 861 *Matrix®* instalada

Los obturadores dejan pasar cada uno de ellos cuando están abiertos un caudal normal diferente q_{n-obt} en litros normales por minuto [nl/min], dados por la ecuación

$$q_{n-obt} = C_{obt} \cdot p_{obt} \quad (7.1)$$

donde C_{obt} es la conductancia del obturador según la Tabla 7.1, y p_{obt} es la presión relativa en [bar] aguas arriba del obturador, siempre considerando que el caudal no está gobernado por la presión aguas abajo del obturador (es decir, se ha alcanzado el caudal límite o condición *choked flow* en el obturador).

Obturador	C_{obt} [nl/min·bar]	Obturador	C_{obt} [nl/min·bar]
1	36,13	6	3,39
2	27,10	7	1,13
3	13,55	8	0,56
4	4,52	9	0,28
5	2,26		

Tabla 7.1. Conductancia por obturador de la válvula *Matrix*®, según (7)

Los obturadores se agrupan, en lo que se refiere a la maniobra abierto/cerrado, en 6 canales según la Tabla 7.2. El caudal normal q_{n-can} que deja pasar cada canal en litros normales por minuto [nl/min] está dado por la ecuación

$$q_{n-can} = C_{can} \cdot p_{obt} \quad (7.2)$$

donde C_{can} es la conductancia del canal, a partir de la de los correspondientes obturadores, según la Tabla 7.3.

Canal	Obturadores
1	1 + 3 + 4
2	2
3	3
4	5 + 6 + 7
5	6
6	7 + 8

Tabla 7.2. Relación de obturadores y canales válvula *Matrix*®, según (7)

La apertura y cierre de cada canal se realiza digitalmente según un código binario de control enviado a la válvula en el que 0 indica cerrado y 1 indica abierto. Los 6 canales se controlan simultáneamente mediante un código binario de 6 bits, que da lugar a $2^6 = 64$ niveles de apertura de la válvula, que proporcionan un caudal normal por unidad de presión aguas arriba del obturador C_N , en [nl/min·bar] dado por la Tabla 7.4. El caudal normal a través de la válvula se calcula según la ecuación

$$q_{n-valvula} = C_N \cdot p_{obt} \quad (7.3)$$

Por tanto se obtiene un control escalonado para C_N , según la Figura 7.2.

Canal	C_{can} [nl/min·bar]
1	54,20
2	27,10
3	13,55
4	6,78
5	3,39
6	1,69

Tabla 7.3. Conductancia por canal de la válvula *Matrix*®, según (7)

Nivel (N)	Patrón 6-bits del canal						C_N [nl/min·bar]
	1	2	3	4	5	6	
	0	0	0	0	0	0	0,00
1	0	0	0	0	0	1	1,69
2	0	0	0	0	1	0	3,39
3	0	0	0	0	1	1	5,08
4	0	0	0	1	0	0	6,78
5	0	0	0	1	0	1	8,47
6	0	0	0	1	1	0	10,17
7	0	0	0	1	1	1	11,86
8	0	0	1	0	0	0	13,55
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
59	1	1	1	0	1	1	99,93
60	1	1	1	1	0	0	101,63
61	1	1	1	1	0	1	103,32
62	1	1	1	1	1	0	105,02
63	1	1	1	1	1	1	106,71

Tabla 7.4. C_N según nivel de apertura de la válvula *Matrix*®, según (7)

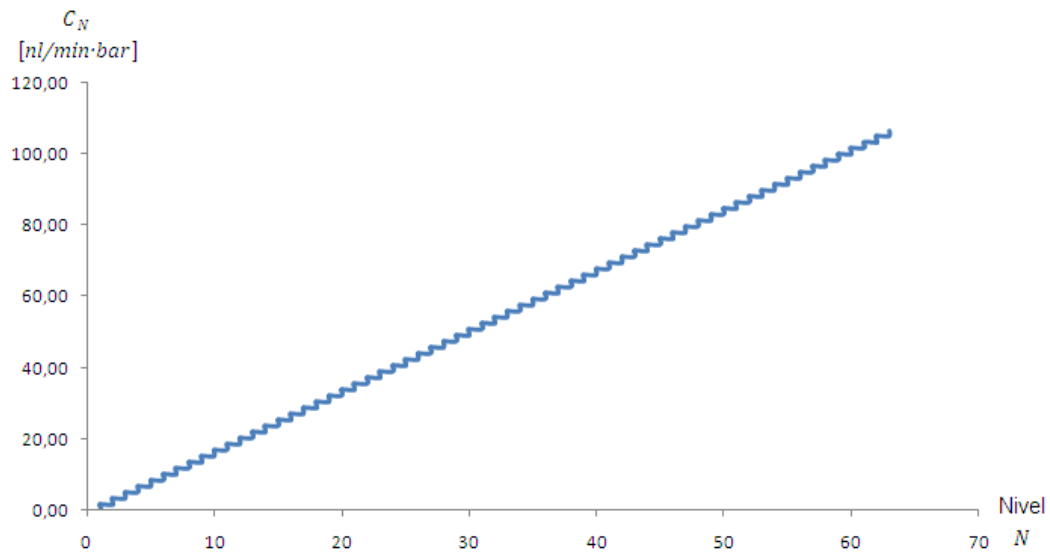


Figura 7.2. Gráfica nivel de apertura - C_N de la válvula *Matrix*® instalada

El control de la apertura de la electroválvula lo realiza la tarjeta *9-Channel Driver Board PCM 8130* de *Matrix*®, la cual permite el control de la apertura de los canales mediante 6 señal digitales enviadas a la tarjeta. Alternativamente se permite el control mediante una señal analógica de 0 - 10V, realizando la tarjeta internamente la conversión al código binario de 6-bits. El caudal normal que la válvula proporciona por unidad de presión aguas arriba del obturador, C_N en [nl/min · bar], queda determinado por la conversión que realiza la tarjeta a los umbrales de tensión de la señal de control de la válvula según la Tabla 7.5, en escalones de tensión de 10 V/63 .

Nivel (N)	Tensión umbral [V]	C_N [nl/min·bar]	Nivel (N)	Tensión umbral [V]	C_N [nl/min·bar]
0	0,000	0,00	32	5,079	54,20
1	0,158	1,69	33	5,238	55,89
2	0,317	3,39	34	5,396	57,59
3	0,476	5,08	35	5,555	59,28
4	0,634	6,78	36	5,714	60,98
5	0,793	8,47	37	5,873	62,67
6	0,952	10,17	38	6,031	64,37
7	1,111	11,86	39	6,190	66,06
8	1,269	13,55	40	6,349	67,75
9	1,428	15,24	41	6,507	69,44
10	1,587	16,94	42	6,666	71,14
11	1,746	18,63	43	6,825	72,83
12	1,904	20,33	44	6,984	74,53
13	2,063	22,02	45	7,142	76,22
14	2,222	23,72	46	7,301	77,92
15	2,380	25,41	47	7,460	79,61
16	2,539	27,10	48	7,619	81,30
17	2,698	28,79	49	7,777	82,99
18	2,857	30,49	50	7,936	84,69
19	3,015	32,18	51	8,095	86,38
20	3,174	33,88	52	8,253	88,08
21	3,333	35,57	53	8,412	89,77
22	3,492	37,27	54	8,571	91,47
23	3,650	38,96	55	8,730	93,16
24	3,809	40,65	56	8,888	94,85
25	3,968	42,34	57	9,047	96,54
26	4,126	44,04	58	9,206	98,24
27	4,285	45,73	59	9,365	99,93
28	4,444	47,43	60	9,523	101,63
29	4,603	49,12	61	9,682	103,32
30	4,761	50,82	62	9,841	105,02
31	4,920	52,51	63	10,000	106,71

Tabla 7.5. Nivel de apertura – C_N de la válvula *Matrix*®, según (7)

La tarjeta *9-Channel Driver Board PCM 8130* es alimentada con una tensión de 24 VDC, cuenta con dos bloques de conexiones mostrados en la Figura 7.3 en el que se conectan en los pines 1 a 12 del bloque izquierdo el cableado de los solenoides de la válvula, y en el bloque derecho la alimentación y las señales de control para la apertura/cierre, ya sean digitales para cada canal (pines 3 a 11) o analógica 0 – 10 V (pin13 para la señal y pin 2 para la referencia). La tarjeta

cuenta con una salida de 10 VDC en el pin 12 para otros usos que se explican en el apartado 7.2.

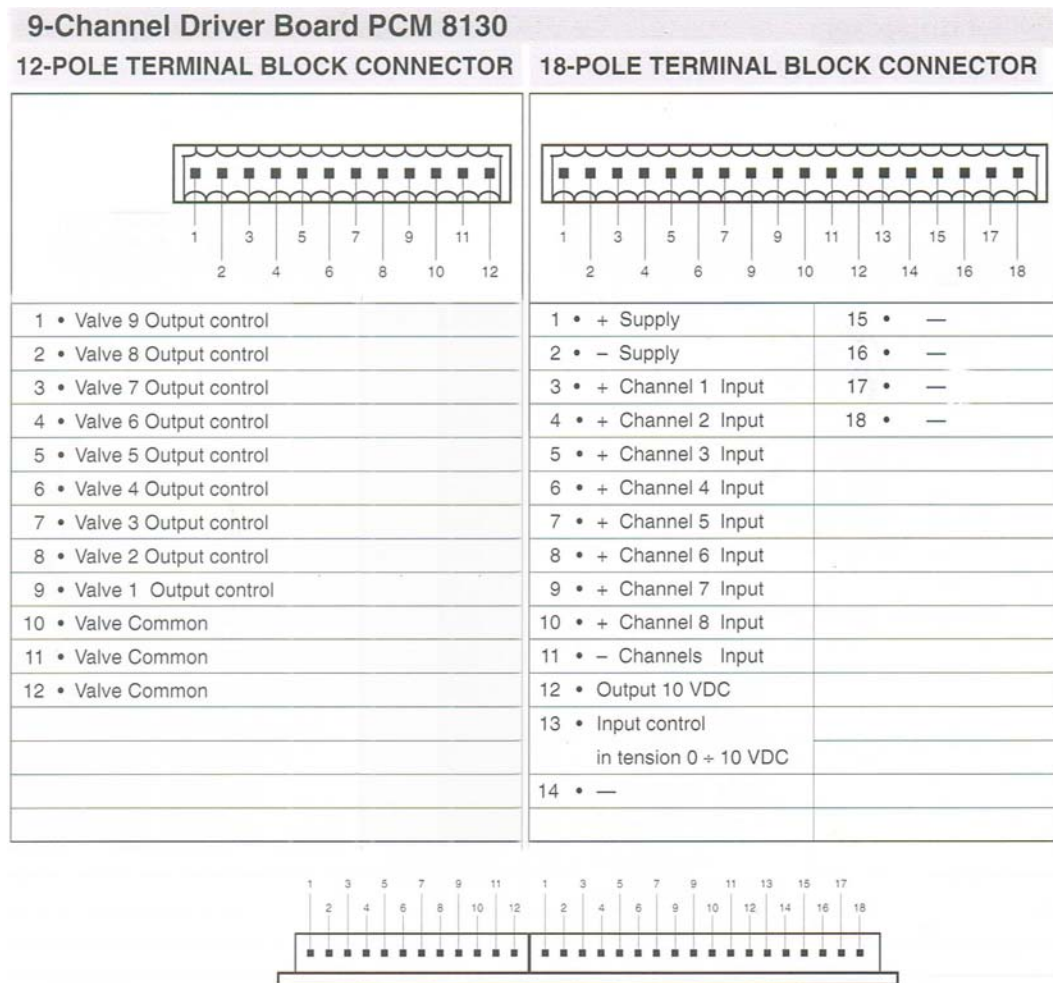


Figura 7.3. Bloques de conexiones tarjeta PCM 8130 de Matrix®, según (7)

Para el modelo de válvula instalado, de 6 canales, los pares de pines en exceso se dejan sin conectar. Esto es así porque internamente las electroválvulas de 6 canales de esta serie comparten estructura interna con las de 8 canales.

Es preciso configurar el interruptor DIP en el interior de la tarjeta *9-Channel Driver Board PCM 8130* según se muestra en la Figura 7.4, según si el control de la electroválvula será mediante una señal analógica o bien mediante una señal digital por canal.

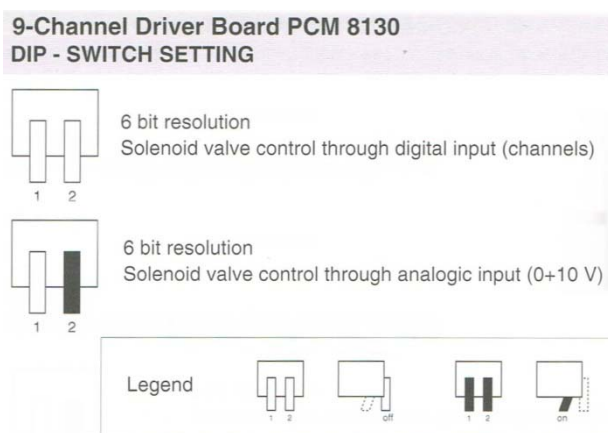


Figura 7.4. Configuración interruptor DIP tarjeta *PCM 8130 Matrix®*, de (7)

7.1.2 Sensores de presión

Con la instalación de los sensores de presión se resuelve el punto B. del apartado 6.3. Los sensores de presión deben tener un tiempo de respuesta que permita realizar lecturas en el rango de frecuencias del apartado 5.3. La estrategia escogida para cumplir con esta especificación consiste en instalar, en el punto donde se quiere leer la presión, dos pares de sensores de diferente tipo uno de ellos de tiempo de respuesta pequeño y otro de dinámica lenta. El primero permitirá lecturas de diferencias de presión en frecuencias altas pero es incapaz de realizar lecturas estáticas, y el segundo dará lecturas de variaciones de presión con frecuencias grandes. Los sensores de presión utilizados para ello son dos unidades del modelo *601A* de *Kistler®* y dos unidades del modelo *3296.074.001* de *VDO®*.

7.1.2.1 Sensores de presión *Kistler®*

El sensor de presión *601A* de *Kistler®*, según manual de instrucciones (8), es un transductor de presión de tipo piezoeléctrico para la medida de presiones dinámicas consistente en un diafragma de acero inoxidable a través del cual actúa la presión sobre un cristal de cuarzo que transforma la presión en una carga electrostática que posteriormente es amplificada y transformada mediante el amplificador de carga *5039A112* de *Kistler®* en una tensión de salida. El transductor de presión se monta roscado con un adaptador sobre el orificio en el que se desea medir, y se conecta al amplificador de carga mediante un cable *Kistler®* apantallado específico.

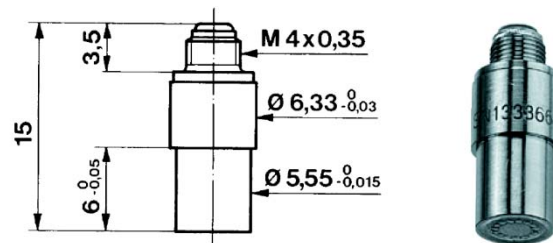


Figura 7.5. Transductor de presión 601A Kistler®, cotas en mm, de (8)

El transductor de presión 601A de Kistler® trabaja en los rangos de presiones de 0 – 250 bar, con un tiempo de respuesta de 3 μs . El amplificador de carga 5039A112 de Kistler® trabaja en los rangos de medida de 50000 pC (Range I) y 5000 pC (Range II). Más información de ellos en los manuales de instrucciones (8) y (9).



Figura 7.6. Amplificador de carga 5039A Kistler®, de (9)

En el Laboratorio del Dpto. de Mecánica de Fluidos de la ETSEIAT – UPC se dispone de tres transductores 601A Kistler® conectados a una caja de conexiones y maniobra que contiene la instalación de tres amplificadores de carga 5039A112 de Kistler®, una fuente de alimentación 220 VAC - 24 VDC con las protecciones reglamentarias, y un panel de mando para las funciones de marcha/paro, reset y rango de medida, según la Figura 7.7. Cada transductor dispone de dos bornes (señal referenciada) correspondientes a la tensión de salida del transductor ya amplificada. La señal referenciada de la tensión de la salida es del rango de -0.5 – 0.5 V correspondiente a un rango de medida de presión de -6 a 6 bar. El conjunto se encuentra preparado para ser utilizado sin necesitar ninguna modificación. Se utilizarán tan solo los sensores etiquetados como KISTLER 1 para la presión al inicio y KISTLER 3 para el final de la tubería.

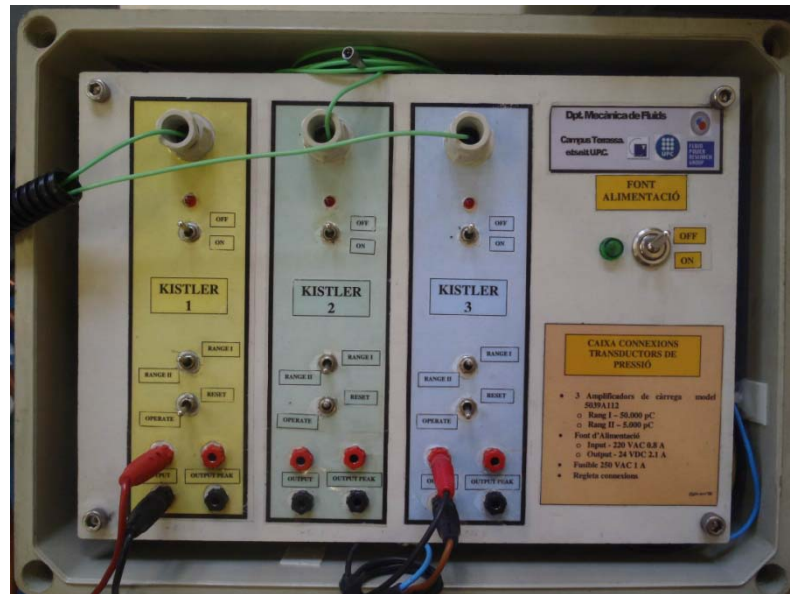


Figura 7.7. Caja de conexiones y maniobra para los transductores piezoeléctricos y amplificadores de carga *Kistler*®. Laboratorio del Dpto. de Mecánica de Fluidos de la ETSEIAT - UPC

7.1.2.2 Sensores de presión VDO®

El sensor de presión 3296.074.001 de VDO®, Figura 7.8, es un transmisor de presión de tipo piezoresistivo de propósito general para la medida de presiones en laboratorio con tiempo de establecimiento superior a 10 ms. El transmisor emite una señal estandarizada de salida en términos de corriente de 4 – 20 mA correspondiente a una presión de 0 – 6 bar, con una tensión de alimentación entre 10 – 30 V. La salida del transmisor es de dos hilos (+ y -) más puesta a tierra, del tipo conector angular.

Para poder leer la señal de medida dada por el transmisor de presión VDO® en términos de tensión se requiere conectar éste en serie en un circuito como el mostrado en la Figura 7.9. El valor de la tensión de alimentación de la fuente V_f y de la resistencia R_s se escogen de manera que la caída de tensión V_s en el transmisor de presión esté en el rango de 10 – 30 V, dados por el fabricante, cuando la corriente que circula por él se encuentra en el rango de presiones de trabajo 0 – 6 bar, es decir 4 – 20 mA. La señal que se envía para la lectura de la presión es V_R en términos de tensión.



Figura 7.8. Transmisor de presión VDO®

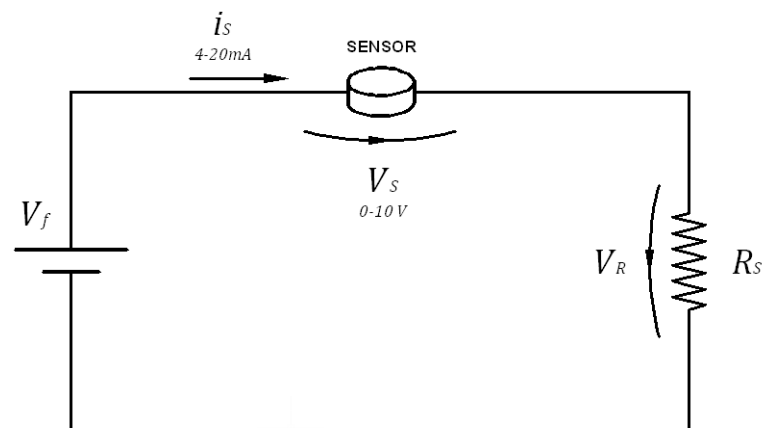


Figura 7.9. Circuito para transmisor de presión VDO®

En el Laboratorio del Dpto. de Mecánica de Fluidos de la ETSEIAT – UPC se dispone de una caja de conexiones, ver Figura 7.10, que aloja una fuente de alimentación 220 VAC - 24 VDC y un circuito electrónico que monta tres resistencias en serie, dos de ellas de 0.268 kΩ y una de 0.682 kΩ, con 6 bornes del tipo banana. El conjunto se pueden adaptar al uso del circuito de la Figura 7.9. El esquema de la caja es el de la Figura 7.11.

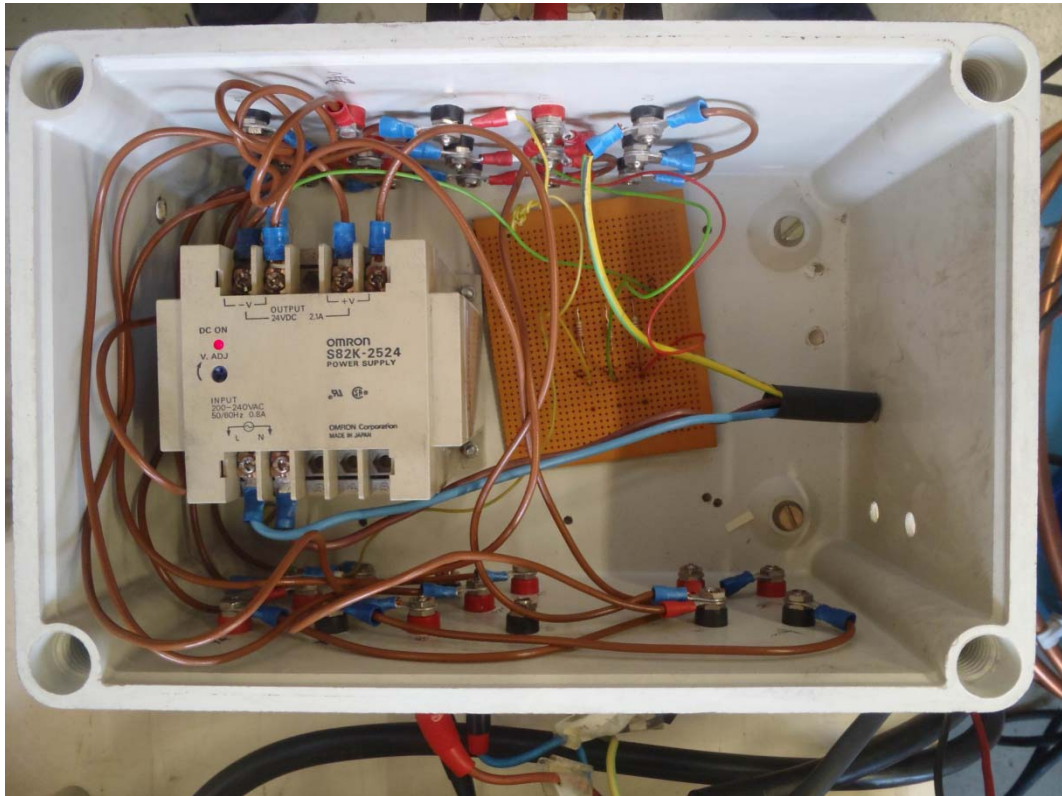


Figura 7.10. Caja de conexiones, fuente de alimentación y circuito para los tres transmisores de presión VDO®. Laboratorio del Dpto. de Mecánica de Fluidos de la ETSEIAT - UPC

Previamente se debe calcular si las resistencias y la tensión de la fuente de alimentación se ajustan a las especificaciones del transmisor de presión VDO®. En este caso $V_f = 24\text{ V}$, $R_s = 0.268\text{ k}\Omega$ (tomando las dos resistencias iguales, una para cada transmisor de presión). En el circuito se cumple la ecuación

$$V_f = V_s + V_R = V_s + i_s \cdot R_s \quad (7.4)$$

Para $i_s = 4\text{ mA}$ tenemos que

$$V_f - i_s \cdot R_s = 24 - 4 \cdot 0.268 = V_s = 22.928\text{ V} \in [10 - 30\text{ V}] \quad (7.5)$$

Para $i_s = 20\text{ mA}$ tenemos que

$$V_f - i_s \cdot R_s = 24 - 20 \cdot 0.268 = V_s = 18.640\text{ V} \in [10 - 30\text{ V}] \quad (7.6)$$

por lo que el circuito se adapta a las necesidades del banco de pruebas.

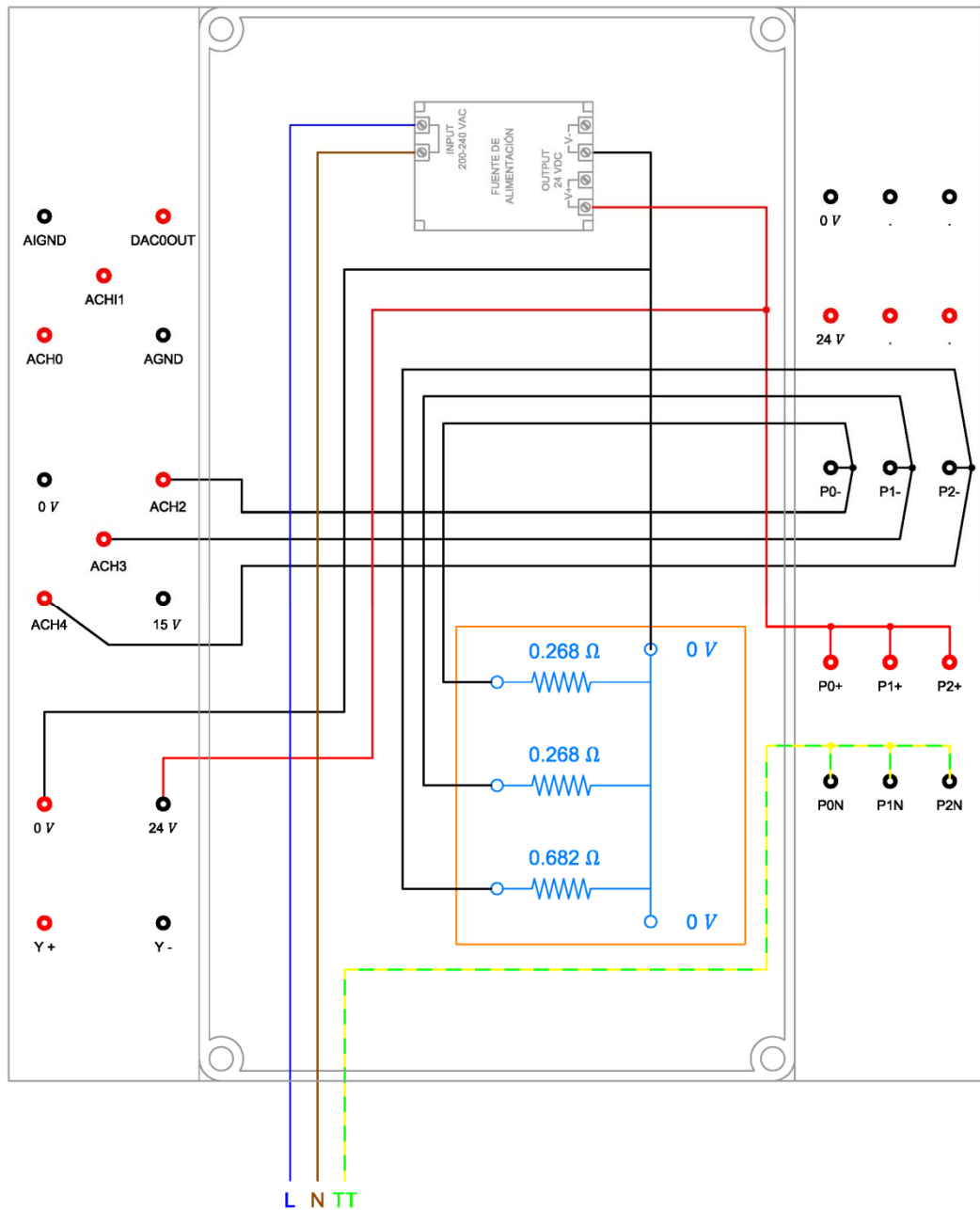


Figura 7.11. Esquema caja de conexiones, fuente de alimentación y circuito para los dos transmisores de presión VDO®

Por otro lado la calibración de la señal V_R enviada a la tarjeta de adquisición de datos para su lectura será la siguiente.

Para una presión de 0 bar

$$V_R = i_s \cdot R_s = 4 \cdot 0.268 = 1.072 \text{ V} \quad (7.7)$$

Para una presión de 6 bar

$$V_R = i_s \cdot R_s = 20 \cdot 0.268 = 5.360 \text{ V} \quad (7.8)$$

Estos datos se utilizarán en la configuración del canal de la entrada analógica correspondiente a estos transmisores de presión.

Los transmisores de presión VDO® se conectarán según se indica en la Figura 7.12, donde también se indica las señales referenciadas V_R que se utilizarán para la lectura de las presiones.

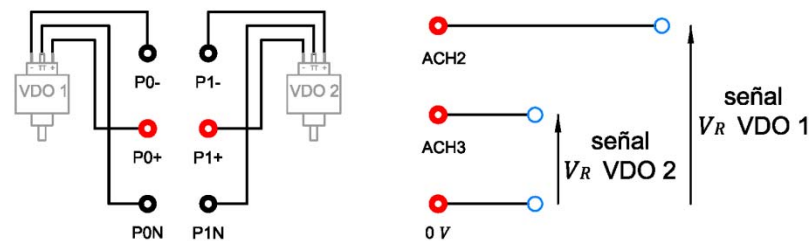


Figura 7.12. Esquema de conexiones en bornes de la caja para los transmisores de presión VDO®.

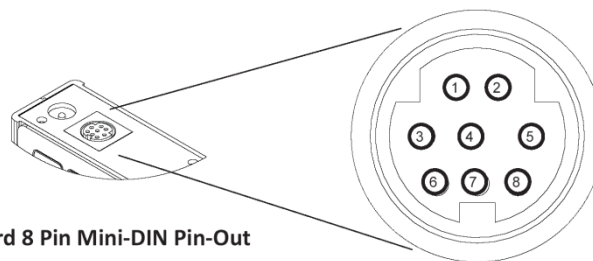
7.1.3 Caudalímetro

La instalación de un caudalímetro resuelve el punto C. del apartado 6.3. Éste se instala en uno de los dos orificios del bloque de cobre que se haya escogido para simular una fuga de fluido, según el ensayo que se quiera realizar. Para regular manualmente la intensidad de la fuga a simular se dispone, aguasabajo del caudalímetro, una pequeña llave de paso.

El modelo instalado es el *M-120SLPM-D* de *Alicat Scientific®*, mostrado en la Figura 7.13. Se trata de un caudalímetro digital para la medida de flujo másico en hasta treinta tipos de gases diferentes, seleccionables desde una pantalla de control en la que también se muestran las lecturas efectuadas de caudal másico, caudal volumétrico, presión y temperatura. Adicionalmente cuenta con un conector de salida tipo Mini-DIN 8 para las comunicaciones, del que obtendremos la señal analógica de la medida. El rango de caudales de medida es de $0 - 120 \text{ sl/min}$, con un tiempo de respuesta de menos de 10 ms . La señal de salida para el caudal volumétrico en sl/min corresponde con los cables color verde y morado del conector Mini-DIN 8 (señal referenciada de $0 - 5 \text{ V}$ para un caudal volumétrico estándar de $0 - 120 \text{ sl/min}$), según Figura 7.14.



Figura 7.13. Caudalímetro modelo M-120SLPM-D de Alicat Scientific®, extraído de (10).



Standard 8 Pin Mini-DIN Pin-Out

Pin	Function	Mini-DIN cable color
1	Not Connected (or optional 4-20mA Primary Output Signal)	Black
2	Static 5.12 Vdc [or optional Secondary Analog Output (4-20mA, 5Vdc, 10Vdc) or Basic Alarm]	Brown
3	Serial RS-232RX / RS-485(-) Input Signal (receive)	Red
4	Meters/Gauges = Remote Tare (Ground to Tare) Controllers = Analog Set-Point Input	Orange
5	Serial RS-232TX / RS-485(+) Output Signal (send)	Yellow
6	0-5 Vdc (or optional 0-10 Vdc) Output Signal	Green
7	Power In (as described above)	Blue
8	Ground (common for power, digital communications, analog signals and alarms)	Purple

Note: The above pin-out is applicable to all the flow meters and controllers with the Mini-DIN connector. The availability of different output signals depends on the options ordered. Optional configurations are noted on the unit's calibration sheet.

Figura 7.14. Conector Mini-DIN 8 de salida del caudalímetro Alicat Scientific® instalado, extraído de (10)

7.1.4 Tarjeta de adquisición de datos

El proceso de acondicionamiento de la señal y digitalización lo realiza la tarjeta de adquisición de datos. El dispositivo instalado es el *PCI-1200* de

National Instruments® que dispone, entre otras detalladas en (11), de lo siguiente:

- ocho canales para entradas analógicas (AI), que se pueden configurar como ocho entradas de un solo terminal o bien como cuatro entradas diferenciales
- un convertidor analógico-digital (ADC) de 12 bits
- dos convertidores digital-analógico (DAC) de 12 bits, que permiten dos salidas analógicas (AO)

La tarjeta *PCI-1200* se debe configurar según el tipo de entrada/salida analógica que vaya a procesar. Las señales de los instrumentos de control y de medida estarán en un rango unipolar 0 – 10 V, y las de entrada provenientes de los instrumentos de control serán señales diferenciales (DIFF). Esta configuración se realiza desde el software *NI-DAQ* que se suministra con la tarjeta.

El dispositivo está formado por la tarjeta propiamente dicha y por un bloque de conexiones como el mostrado en la Figura 7.15. La tarjeta se conecta al ordenador mediante el bus PCI y el bloque conector a la tarjeta mediante un cable de bus RTSI.

ACH0	1	2	ACH1
ACH2	3	4	ACH3
ACH4	5	6	ACH5
ACH6	7	8	ACH7
AISENSE/AIGND	9	10	DAC0OUT
AGND	11	12	DAC1OUT
DGND	13	14	PA0
PA1	15	16	PA2
PA3	17	18	PA4
PA5	19	20	PA6
PA7	21	22	PB0
PB1	23	24	PB2
PB3	25	26	PB4
PB5	27	28	PB6
PB7	29	30	PC0
PC1	31	32	PC2
PC3	33	34	PC4
PC5	35	36	PC6
PC7	37	38	EXTTRIG
EXTUPDATE*	39	40	EXTCONV*
OUTB0	41	42	GATB0
OUTB1	43	44	GATB1
CLKB1	45	46	OUTB2
GATB2	47	48	CLKB2
+5 V	49	50	DGND

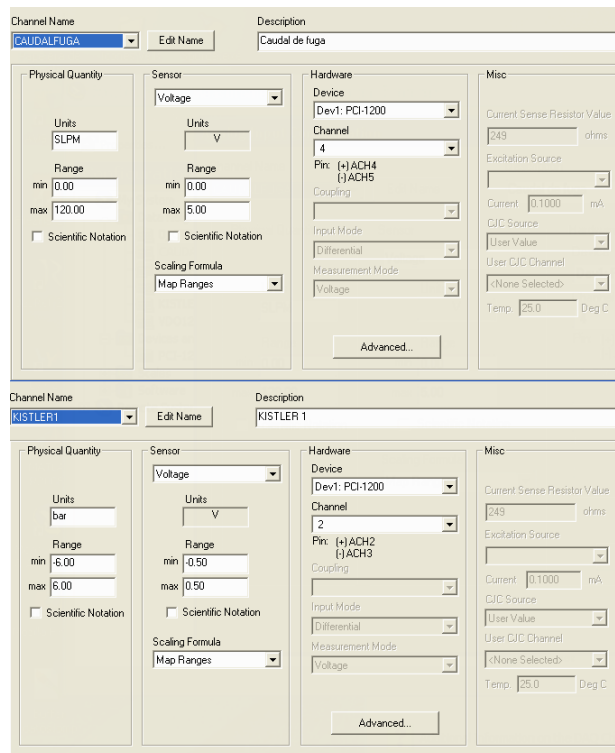
Figura 7.15. Bloque de conexiones de la tarjeta *PCI-1200* de *National Instruments®*, extraído de (11)

La descripción de las señales indicadas en la Figura 7.15 se muestra en la Figura 7.16.

Pin	Signal Name	Direction	Reference	Description	Pin	Signal Name	Direction	Reference	Description
1-8	ACH<7..0>	AI	AGND	Analog Channel 7 through 0—Analog input channels 0 through 7.	40	EXTCONV*	DIO	DGND	External Convert—External control signal to time A/D conversions (DI) and drive SCANCLK when you use SCXI (DO).
9	AISENSE/AIGND	I/O	AGND	Analog Input Sense/Analog Input Ground—Connected to AGND in RSE mode; analog input sense in NRSE mode.	41	OUTB0	DO	DGND	Output B0—Digital output signal of counter B0.
10	DAC0OUT	AO	AGND	Digital-to-Analog Converter 0 Output—Voltage output signal for analog output channel 0.	42	GATB0	DI	DGND	Gate B0—External control signal for gating counter B0.
11	AGND	N/A	N/A	Analog Ground—Analog output ground reference for analog output voltages. Bias current return point for differential measurements.	43	OUTB1	DIO	DGND	Output B1—Digital output signal of counter B1 (DO). External control signal for timing a scan interval (DI).
12	DAC1OUT	AO	AGND	Digital-to-Analog Converter 1 Output—Voltage output signal for analog output channel 1.	44	GATB1	DI	DGND	Gate B1—External control signal for gating counter B1.
13, 50	DGND	N/A	N/A	Digital Ground—Voltage ground reference for the digital signals and the +5 V supply.	45	CLKB1	DI	DGND	Clock B1—External control clock signal for counter B1.
14-21	PA<7..0>	DIO	DGND	Port A 7 through 0—Bidirectional data lines for port A. PA7 is the MSB, and PA0 is the LSB.	46	OUTB2	DO	DGND	Counter B2—Digital output signal of counter B2.
22-29	PB<7..0>	DIO	DGND	Port B 7 through 0—Bidirectional data lines for port B. PB7 is the MSB, and PB0 is the LSB.	47	GATB2	DI	DGND	Gate B2—External control signal for gating counter B2.
30-37	PC<7..0>	DIO	DGND	Port C 7 through 0—Bidirectional data lines for port C. PC7 is the MSB, and PC0 is the LSB.	48	CLKB2	DI	DGND	Clock B2—External control clock signal for counter B2.
38	EXTTRIG	DI	DGND	External Trigger—External control signal to trigger a DAQ operation.	49	+5 V	DO	DGND	+5 Volts—This pin is fused for up to 1 A of +4.65 to +5.25 V.
39	EXTUPDATE*	DI	DGND	External Update—External control signal to update DAC outputs.	* Indicates that the signal is active low. AI = Analog Input DI = Digital Input DIO = Digital Input/Output AO = Analog Output DO = Digital Output N/A = Not Applicable				

Figura 7.16. Descripción de las señales del bloque de conexiones de la tarjeta PCI-1200 de National Instruments®, extraído de (11)

La configuración de los canales de la tarjeta *PCI-1200* se hace siguiendo las características de las señales analógicas de entrada y de salida de la tarjeta, basándonos en los datos expuestos de los instrumentos de control y de medición. Para los canales de entrada la configuración en fase de ensayos se muestra en la Figura 7.17 y la Figura 7.18, y en la Figura 7.19 se muestra la configuración sólo para la fase de pruebas. Para el canal de salida la configuración se muestra en la Figura 7.20.



The image shows two screenshots of the PCI-1200 configuration software interface. Each window is divided into four main sections: Physical Quantity, Sensor, Hardware, and Misc.

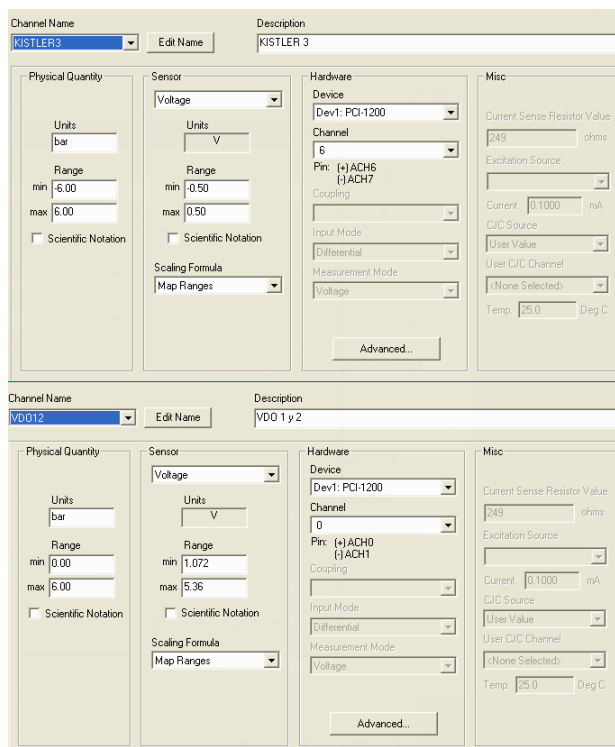
Top Window (CAUDALFUGA):

- Channel Name:** CAUDALFUGA
- Description:** Caudal de fuga
- Physical Quantity:** Units: SLM, Range: min 0.00, max 120.00
- Sensor:** Voltage, Units: V, Range: min 0.00, max 5.00
- Hardware:** Device: PCI-1200, Channel: 4, Pin: (+)ACH4, (-)ACH5
- Misc:** Current Sense Resistor Value: 249 ohms, Current: 0.1000 mA, Temp: 25.0 Deg C

Bottom Window (KISTLER1):

- Channel Name:** KISTLER1
- Description:** KISTLER 1
- Physical Quantity:** Units: bar, Range: min 6.00, max 6.00
- Sensor:** Voltage, Units: V, Range: min 0.50, max 0.50
- Hardware:** Device: PCI-1200, Channel: 2, Pin: (+)ACH2, (-)ACH3
- Misc:** Current Sense Resistor Value: 249 ohms, Current: 0.1000 mA, Temp: 25.0 Deg C

Figura 7.17. Configuración canales de entrada de la tarjeta *PCI-1200* (1 / 3)



The image shows two screenshots of the PCI-1200 configuration software interface. Each window is divided into four main sections: Physical Quantity, Sensor, Hardware, and Misc.

Top Window (KISTLER3):

- Channel Name:** KISTLER3
- Description:** KISTLER 3
- Physical Quantity:** Units: bar, Range: min 6.00, max 6.00
- Sensor:** Voltage, Units: V, Range: min 0.50, max 0.50
- Hardware:** Device: PCI-1200, Channel: 6, Pin: (+)ACH6, (-)ACH7
- Misc:** Current Sense Resistor Value: 249 ohms, Current: 0.1000 mA, Temp: 25.0 Deg C

Bottom Window (VDO12):

- Channel Name:** VDO12
- Description:** VDO 1 y 2
- Physical Quantity:** Units: bar, Range: min 0.00, max 6.00
- Sensor:** Voltage, Units: V, Range: min 1.072, max 5.36
- Hardware:** Device: PCI-1200, Channel: 0, Pin: (+)ACH0, (-)ACH1
- Misc:** Current Sense Resistor Value: 249 ohms, Current: 0.1000 mA, Temp: 25.0 Deg C

Figura 7.18. Configuración canales de entrada de la tarjeta *PCI-1200* (2 / 3)

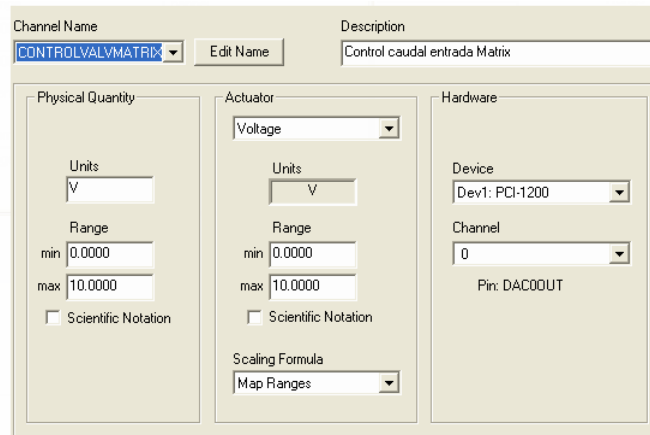


Figura 7.19. Configuración canales de entrada de la tarjeta *PCI-1200* (3 / 3)

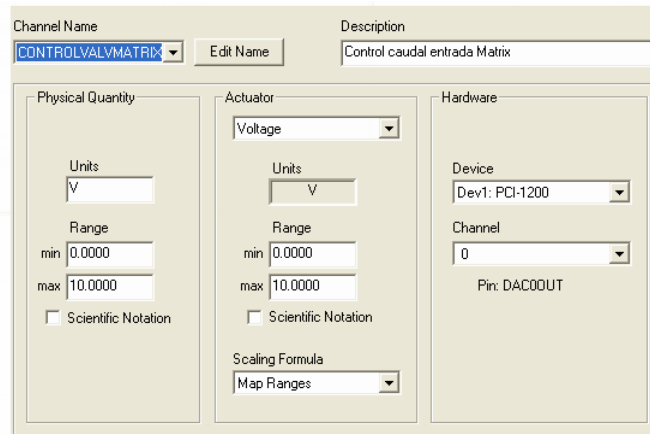


Figura 7.20. Configuración canal de salida de la tarjeta *PCI-1200*

7.1.5 Filtro paso bajo

Las señales de medida proporcionadas por el caudalímetro y los transmisores de presión VDO® son filtradas, previamente a la adquisición de datos, para obtener una señal con frecuencias por debajo de los 10 Hz aproximadamente. Para ello se instala el filtro analógico paso bajo FBU-8 LP de Audon Electronics® como el mostrado en la Figura 7.21. Se instala con cuatro resistencias de 100 k Ω , no mostradas en la figura, para obtener una frecuencia de corte de 10 Hz, y una ganancia unitaria. Con este filtro se resuelve el punto E. del apartado 6.3.

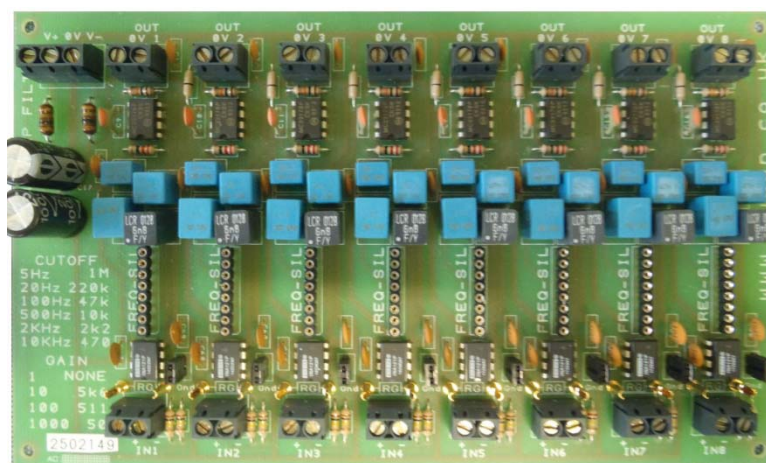


Figura 7.21. Filtro paso bajo instalado

7.1.6 Instrumentación virtual

La integración del control de los parámetros del ensayo y del proceso de adquisición de datos se consigue mediante la programación de un instrumento virtual, de manera que el usuario del banco de pruebas tiene acceso a un entorno que le permite definir el ensayo a realizar, controlar los instrumentos de control, adquirir los datos procedentes de los instrumentos de medida, y procesar y almacenar éstos en un ordenador. Para el desarrollo y la ejecución de esta instrumentación virtual se ha escogido la plataforma de desarrollo LabView® de National Instruments®, versión 5.1. De esta manera se resuelve el punto F del apartado 6.3.

La programación de un instrumento virtual en esta plataforma se realiza de forma gráfica en lenguaje G, y consiste en la definición de:

- un *panel frontal* donde se colocan los controles e indicadores del banco de pruebas, a partir de los existentes en la *paleta de controles*

- un *diagrama de bloques* donde se coloca el código fuente gráfico, a partir de los existentes en la *paleta de funciones*, y donde se definen las relaciones, de entre las disponibles en la *paleta de herramientas*, entre los *diagrama de bloques* y de éstos con los controles e indicadores del *panel frontal*

LabView® sigue un modelo *dataflow* para ejecutar el código programado, con lo que los resultados se actualizan según los eventos que se sucedan durante la ejecución.

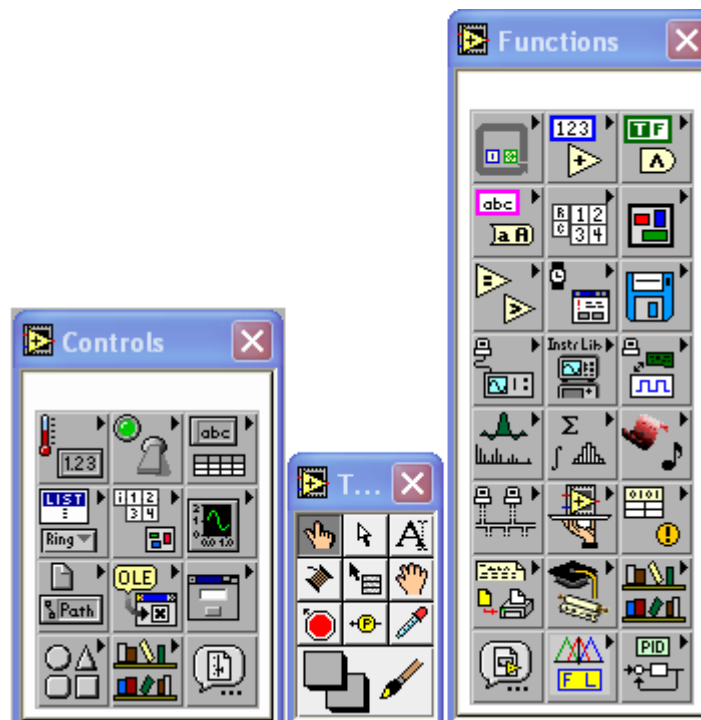


Figura 7.22. Paleta de controles, herramientas y funciones en *LabView®*

El banco de pruebas, en cuanto a adquisición de datos y instrumentación virtual se refiere, debe de ser capaz tanto de adquirir señales analógicas provenientes de los instrumentos de medida y como de generar las señales para los instrumentos de control, todo ello simultáneamente. A partir del diagrama de flujo extraído de (12), mostrado en la Figura 7.23, se determina de qué tipo de instrumento virtual se partirá como base para el banco de pruebas.

El banco de pruebas requiere realizar lecturas de los 4 canales de entrada analógica correspondientes a los instrumentos de medición, al tiempo que generar la señal analógica de control de la electroválvula, todo ello con ratios de muestreo de 1,000 muestras por segundo, equivalente a un intervalo de tiempo

de muestreo especificado de 1 milisegundo, durante un tiempo total de 60 segundos. Esto conlleva un tamaño de 300,000 muestras.

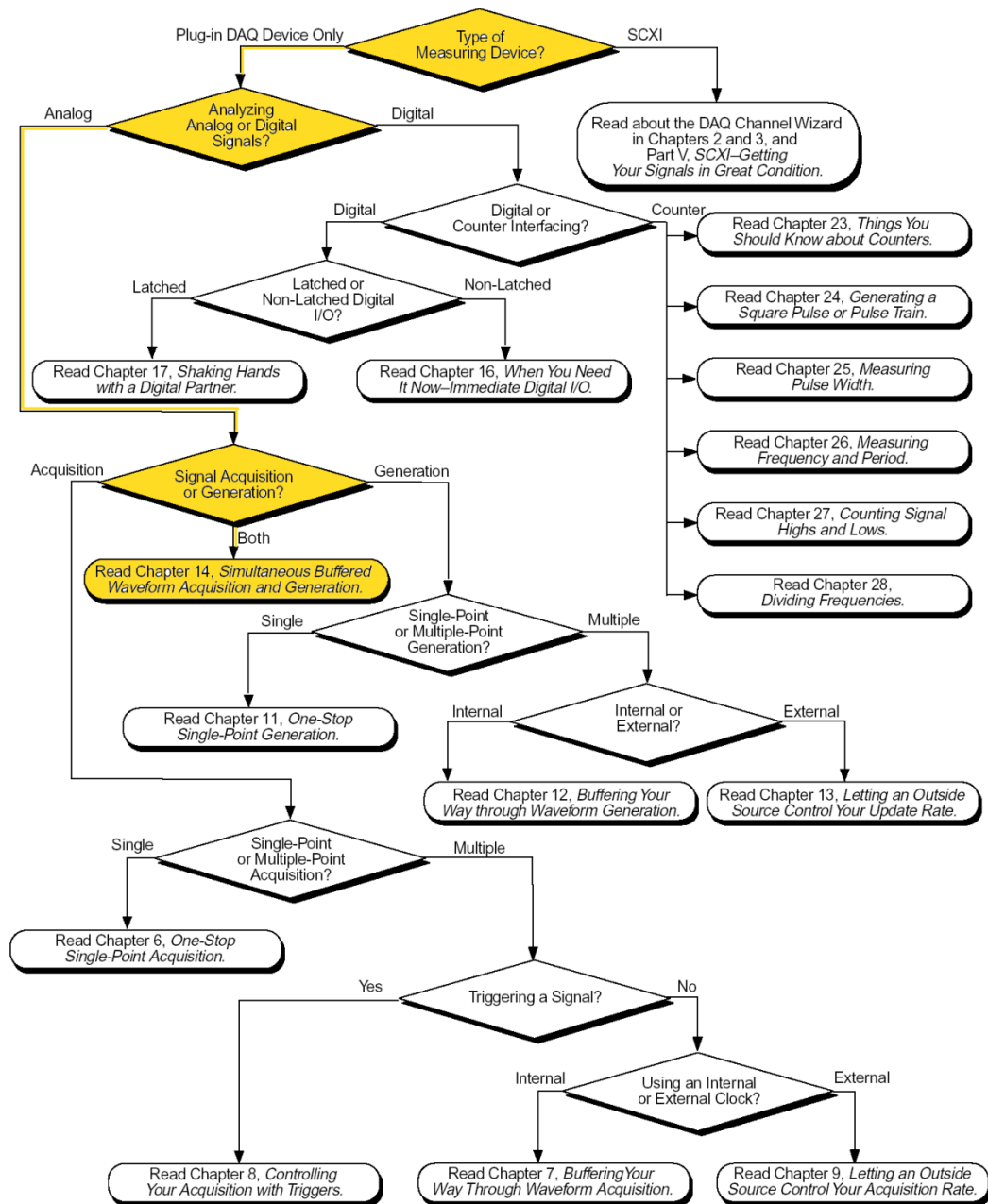


Figura 7.23. Diagrama de flujo extraído de (12) LabView®

La adquisición convencional de esta cantidad de datos en intervalos de tiempo tan cortos presenta el inconveniente de que el software debe leer y escribir los datos de forma repetitiva lo cual es ineficiente y consume demasiado tiempo en el acceso a éstos, por lo que el software no podrá cumplir con el intervalo de tiempo de muestreo deseado. Por tanto es necesario adquirir los datos utilizando un buffer de entrada/salida para transferir los datos desde la

tarjeta de adquisición de datos a la memoria del ordenador, de esta manera se reduce el número de accesos y se tiene mayor control sobre el tiempo en que se toman las muestras.

Independientemente del ordenador utilizado, el tamaño del buffer de entrada y de salida analógicas está limitado por la tarjeta de adquisición de datos utilizada. Para la tarjeta *PCI-1200* instalada en el banco de pruebas este tamaño máximo es de 64,000 muestras, frente a las 300,000 muestras que se prevén manejar en un ensayo. Este inconveniente se resuelve utilizando el buffer de entrada/salida de forma cíclica, de forma que los nuevos datos adquiridos se sobrescriben continuamente en el buffer encima de los datos que ya han sido procesados por el software. Tan solo se debe controlar durante la ejecución que el tamaño del buffer y la frecuencia de muestreo sean tales que no se sobrescriban datos que aún no hayan sido procesados por el software.

Considerando todo lo anterior, para diseñar el instrumento virtual del banco de pruebas se ha partido, como base, del instrumento virtual *Simul AI/AO Buffered (Lab/1200)* pre-programado por *National Instruments®* permite la lectura y la generación de señales simultáneamente utilizando buffers de entrada/salida cíclicamente, y está disponible en la carpeta de ejemplos de *LabView®*. Este instrumento está programado para utilizarse con la tarjeta de adquisición de datos *PCI-1200* de *National Instruments®*, y sólo deberá modificarse para adaptarlo al *panel de control* diseñado para el banco de pruebas. Adicionalmente se ampliará el instrumento virtual base para realizar la escritura de los datos en un fichero que sea compatible con programas de hoja de cálculo y con el entorno de desarrollo integrado *MATLAB®*, para su posterior procesamiento. Esta ampliación se realiza utilizando como base el instrumento virtual *Cont Acq to Spreadsheet File.vi* pre-programado por *National Instruments®*.

El archivo finalmente programado consta del *diagrama de bloques* mostrado en la Figura 7.24 y la Figura 7.25. El *panel frontal* del mismo archivo se muestra en la Figura 7.26. El funcionamiento del conjunto es el siguiente. El usuario introduce en el *panel frontal* los datos generales referentes al ensayo a realizar, los nombres de los canales analógicos de entrada y salida configurados previamente en el programa *driver* del dispositivo de adquisición *PCI-1200*, escoge el tipo de rizado de la señal de control de la electroválvula de entrada y sus parámetros, los tamaños del buffer de entrada/salida, el número de muestras por segundo a adquirir de los canales de entrada, y el número de muestras que al mismo tiempo se desean pasar del buffer a las gráficas y al archivo de resultados, por defecto *datos.txt*. El inicio y final del ensayo comienza y acaba manualmente con los botones de control previstos en el *panel frontal*.

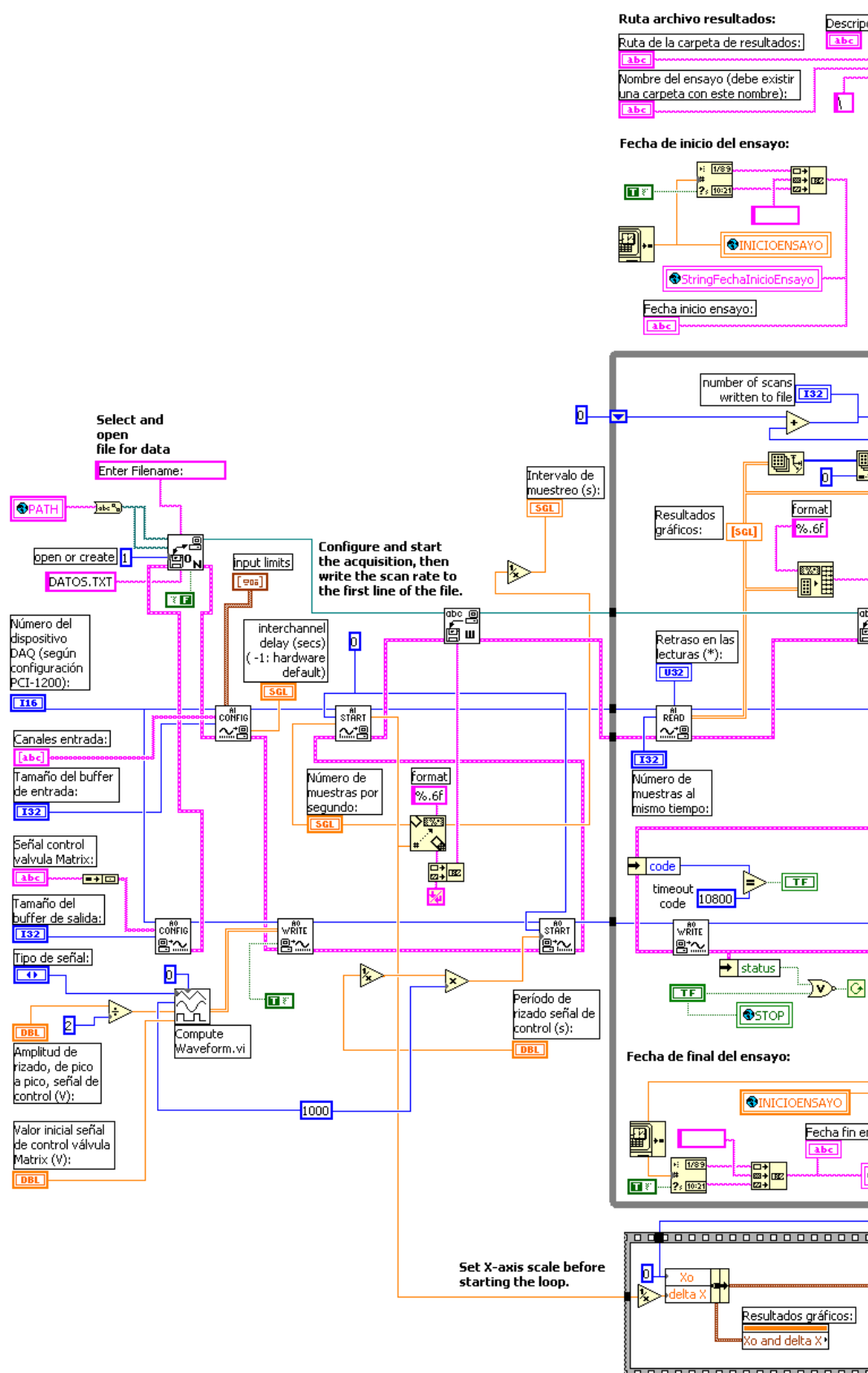


Figura 7.24. Diagrama de bloques programado con LabView® (1 / 2)

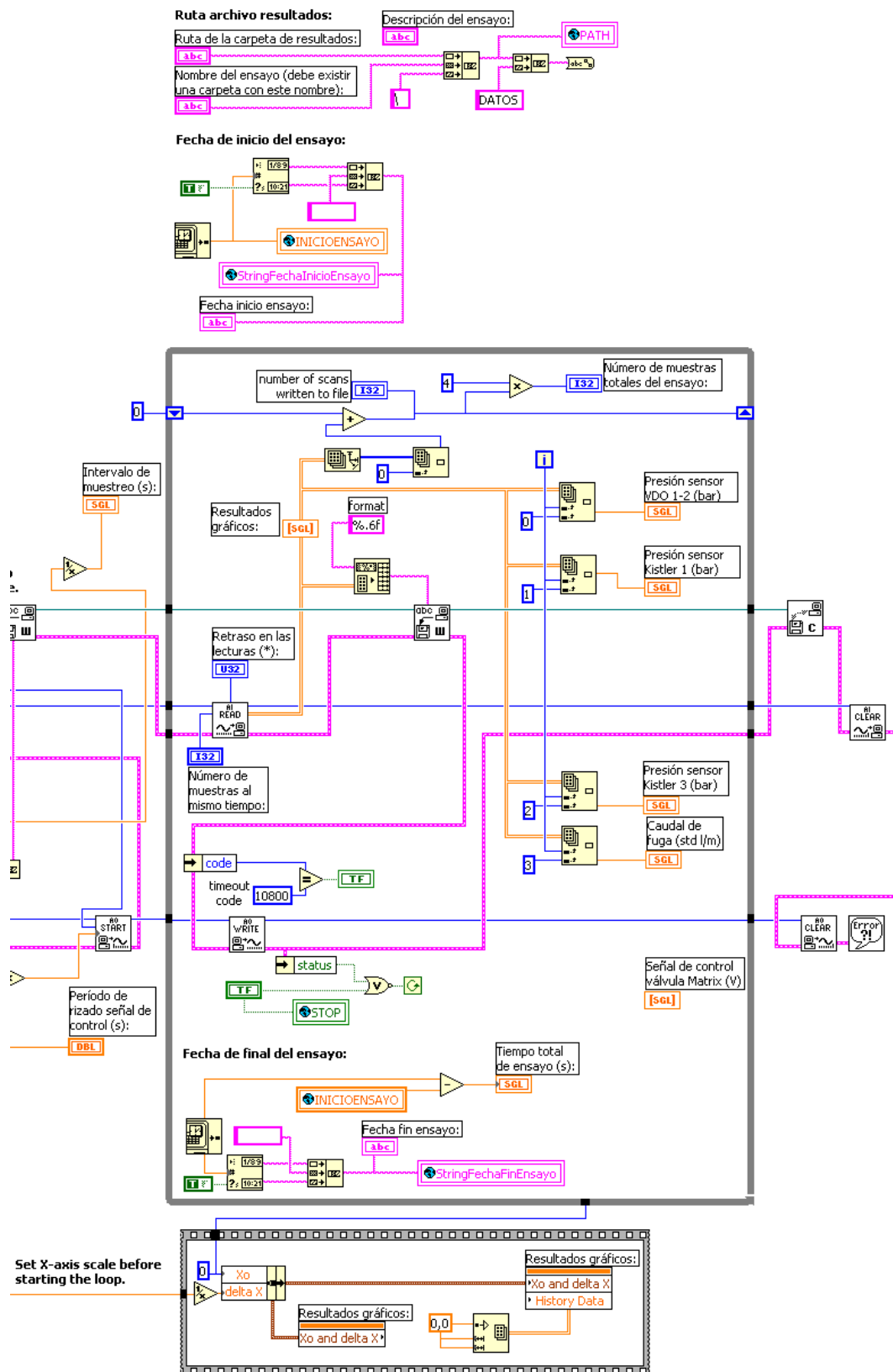


Figura 7.25. Diagrama de bloques programado con LabView® (2 / 2)

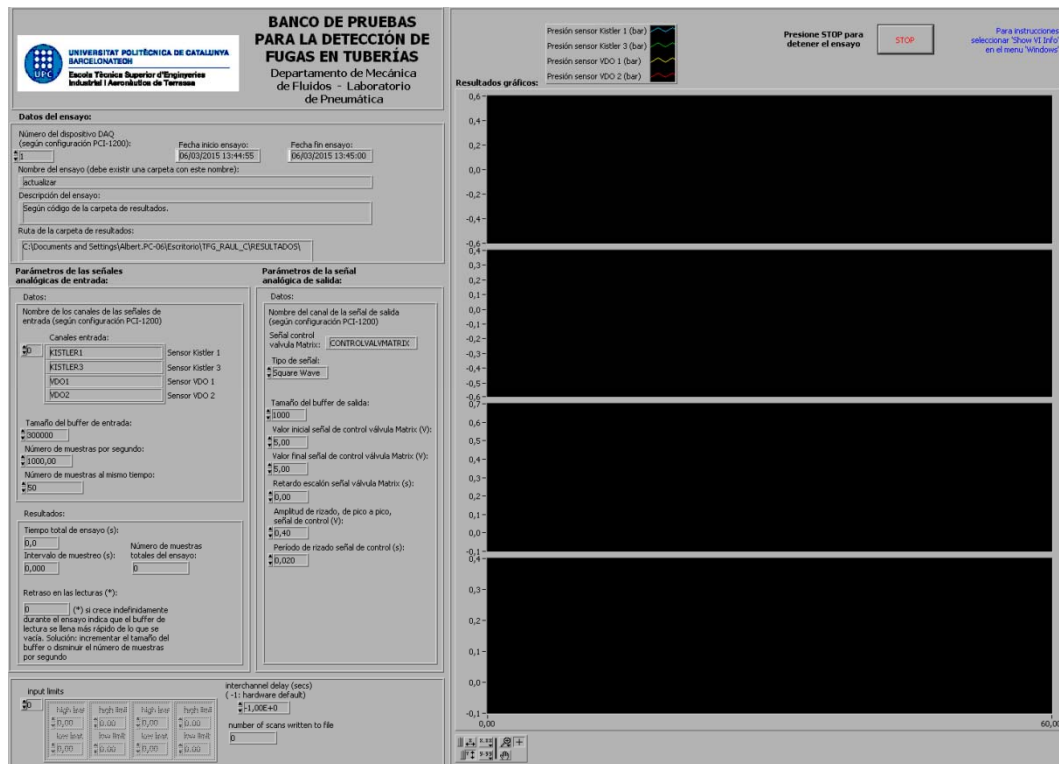


Figura 7.26. Panel frontal del archivo programado en LabView®

7.2 Conexionado de la instrumentación

El conexionado de la instrumentación está condicionado por el hecho de que interesa, en fase de pruebas, controlar la electroválvula *Matrix*® manualmente sin necesidad de generar la señal de control en tensión mediante *LabView*®. Este punto se resuelve instalando un conmutador para controlar la electroválvula en modo manual o en modo *LabView*® según se quiera.

Otro condicionante es que la tarjeta de adquisición de datos *PCI-1200* tiene limitado el número de canales de entrada analógica en modo diferencial (DIFF) a cuatro, con los que debemos realizar lecturas de cuatro sensores de presión y un caudalímetro. En fase de pruebas se configuraron dos canales de lectura para los sensores *Kistler*®, un canal para el caudalímetro y el canal restante alternativamente (mediante un conmutador) para el sensor *VDO*® del inicio y el sensor *VDO*® del final, y se conmutaba la señal enviada al canal a mitad de la prueba, teniendo en cuenta este hecho a la hora de componer adecuadamente las presiones dadas por los sensores *VDO*® y *Kistler*®. Este proceder es correcto en tanto que en el modelo teórico tan sólo interesa el espectro de frecuencias de las presiones al inicio y al final. En fase de ensayos, al poder controlar el caudal mediante la pantalla que el caudalímetro incorpora, no se adquirieron datos del caudal de fuga, dejando los cuatro canales de la tarjeta para la adquisición de las cuatro señales, dadas por los dos sensores *Kistler*® y los dos sensores *VDO*®.

En la Figura 7.27 se muestra el esquema de conexiones, tanto de la instalación neumática como de la de comunicación de las señales, del banco de pruebas, exceptuando la parte de la tarjeta de adquisición de datos *PCI-1200* la cual se muestra en la Figura 7.28 y Figura 7.29 para la fase de pruebas y para la fase de ensayos definitiva respectivamente.

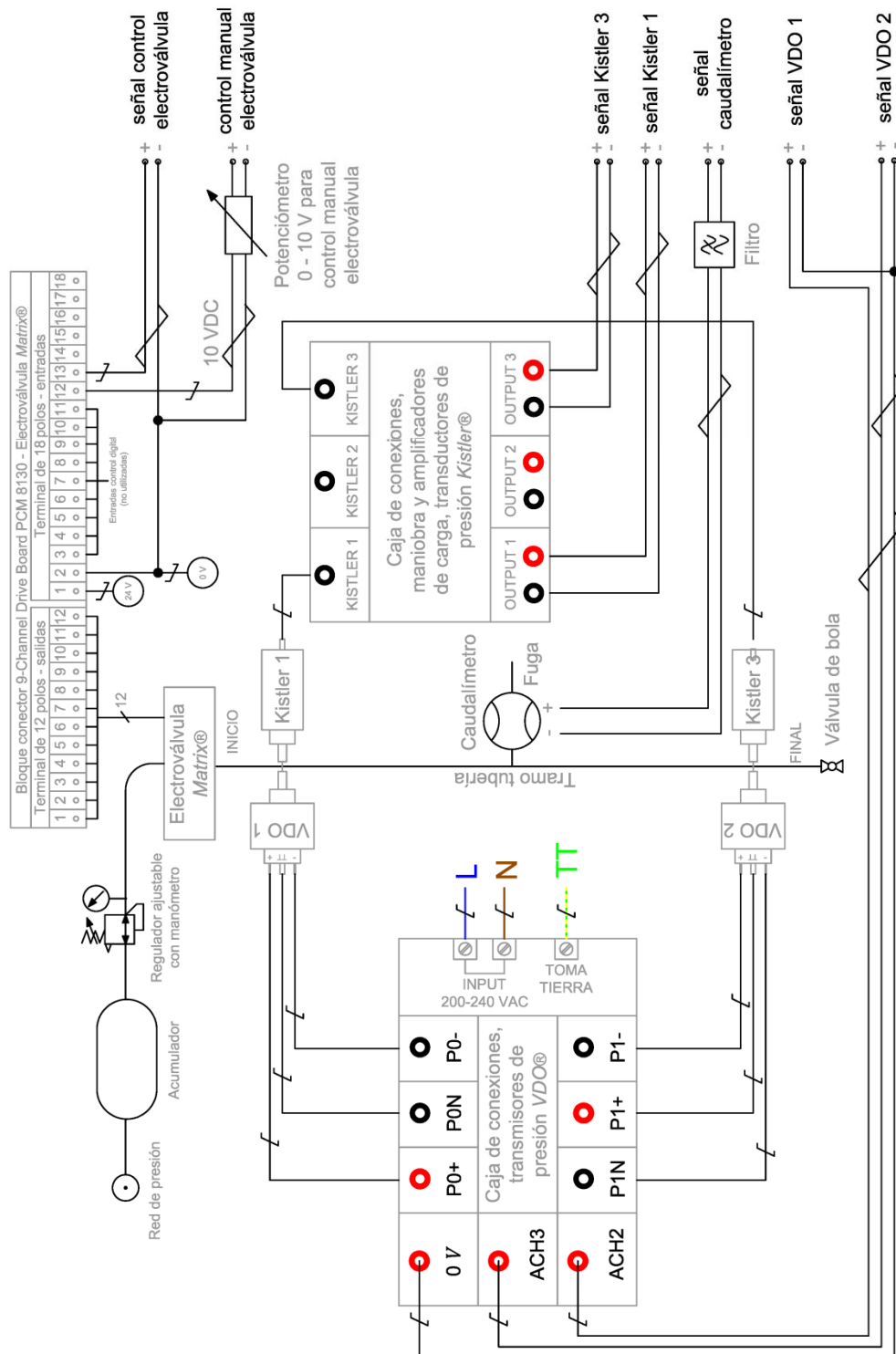


Figura 7.27. Esquema de conexiones, excepto tarjeta PCI-1200

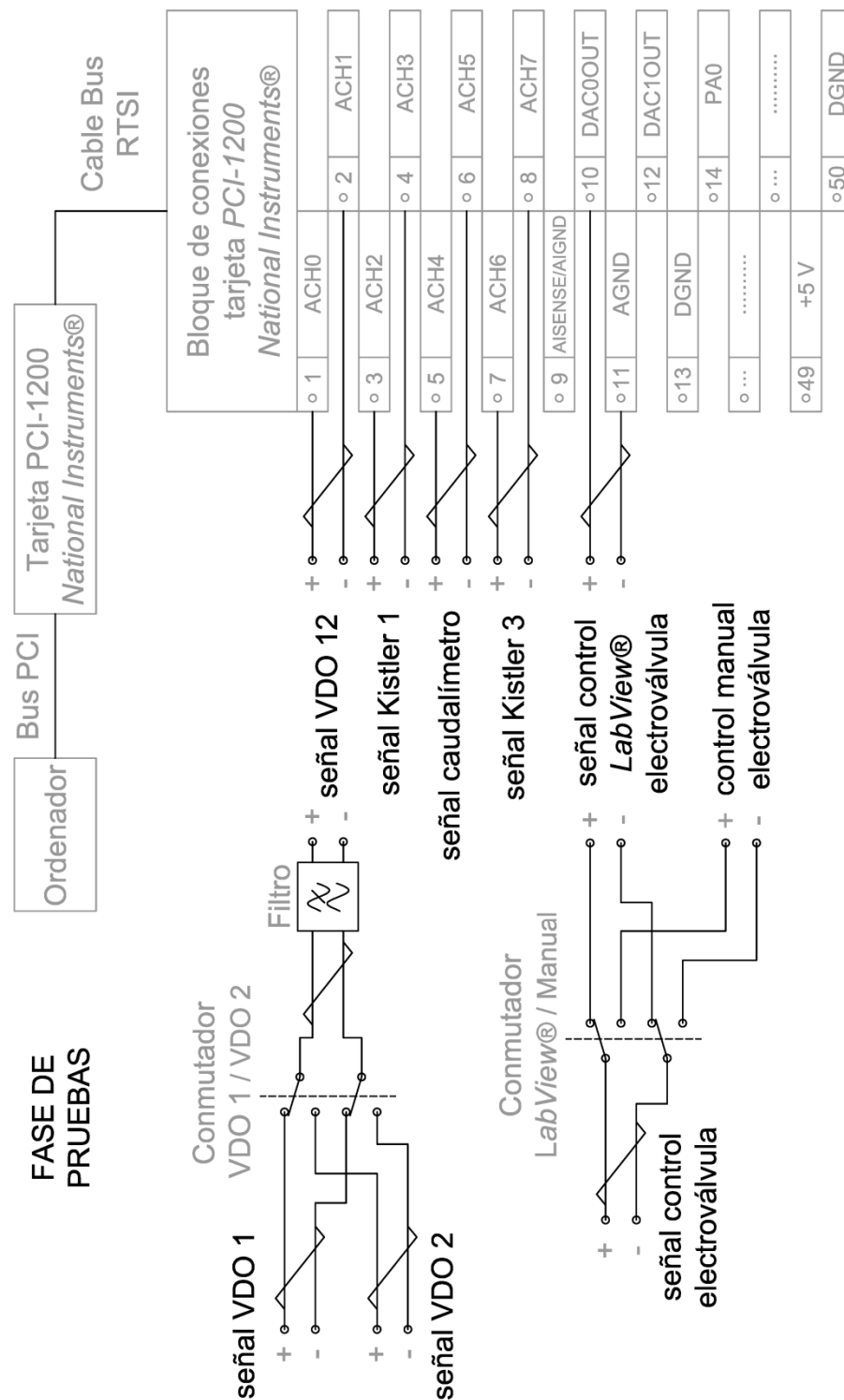


Figura 7.28. Esquema de conexiones tarjeta *PCI-1200*, fase de pruebas

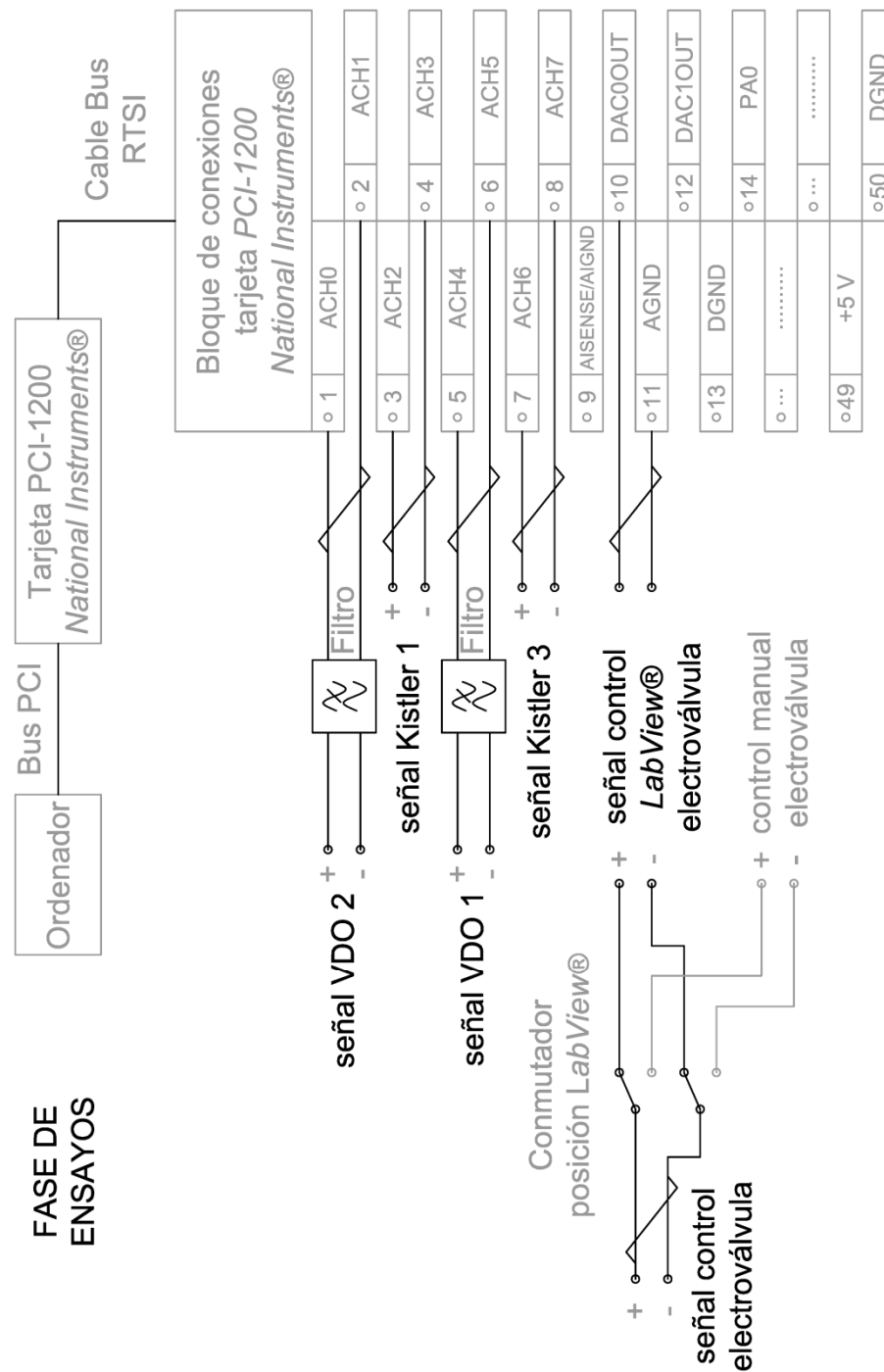


Figura 7.29. Esquema de conexiones tarjeta *PCI-1200*, fase de ensayos

7.3 Visión global del banco de pruebas

Se muestran en este apartado las fotografías que permiten, de mayor a menor detalle, una visión global del banco de pruebas.

En la Figura 7.30 se muestra la conexión del caudalímetro en uno de los bloques de orificios en que se simula una fuga.

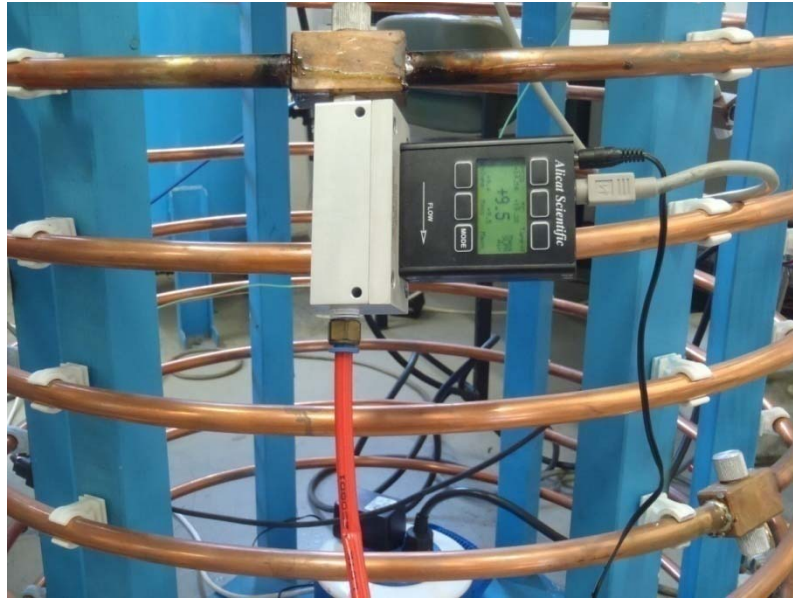


Figura 7.30. Instalación del caudalímetro en un punto de fuga simulado



Figura 7.31. Bloque con orificios tapados cuando no son usados

La Figura 7.31 muestra uno de los bloques con los orificios tapados cuando no se utiliza para simular fuga ni para instalar instrumentos de medida.

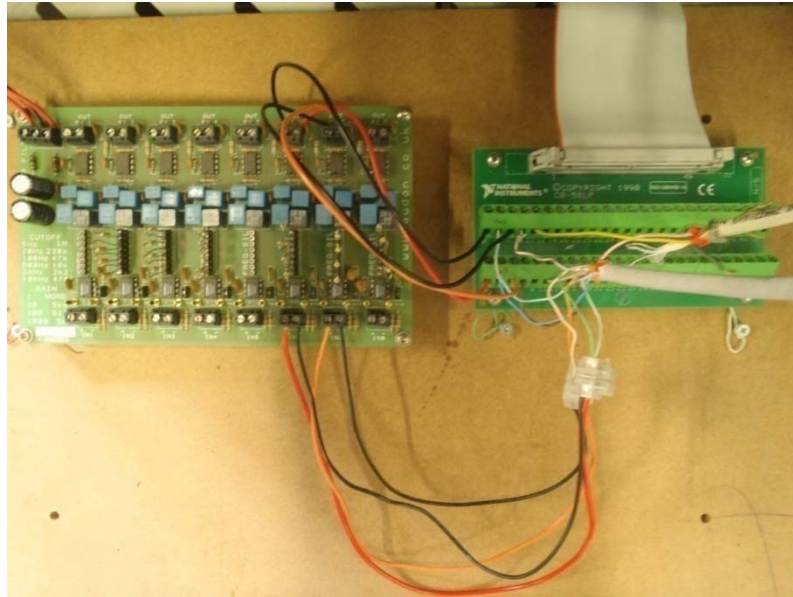


Figura 7.32. Bloque de conexiones tarjeta *PCI-1200* y filtro pasa bajo (izq.)

En la Figura 7.32 se muestra el bloque de conexiones de la tarjeta de adquisición de datos *PCI-1200* y las señales filtradas por el filtro pasa bajo.

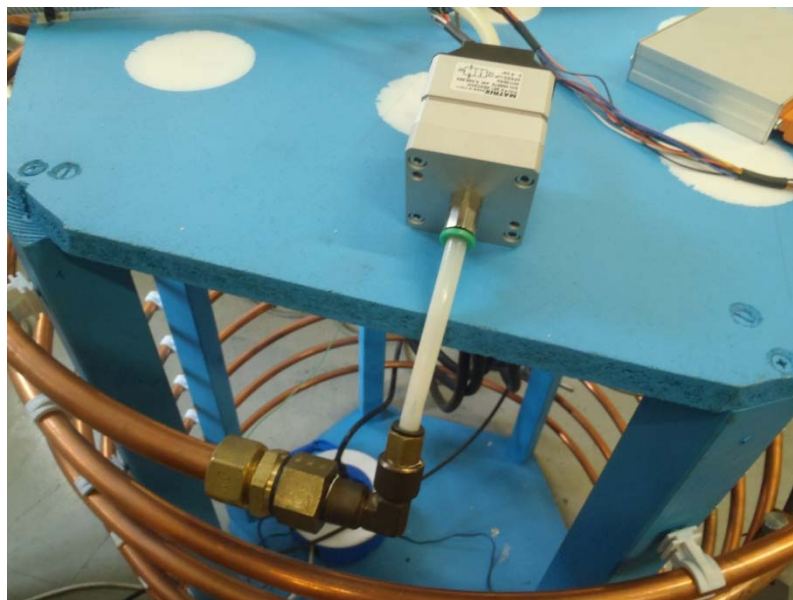


Figura 7.33. Electroválvula *Matrix®* al inicio del tramo de tubería

En la Figura 7.33 se observa la electroválvula instalada al inicio del tramo de tubería.

El detalle de las conexiones en la 9-Channel Drive Board PCM 8130 que controla la apertura de la electroválvula *Matrix*® se muestra en la Figura 7.34.

La Figura 7.35 muestra la caja de conexiones y maniobra para los transductores de presión Kistler®, la cual incluye los amplificadores de carga.

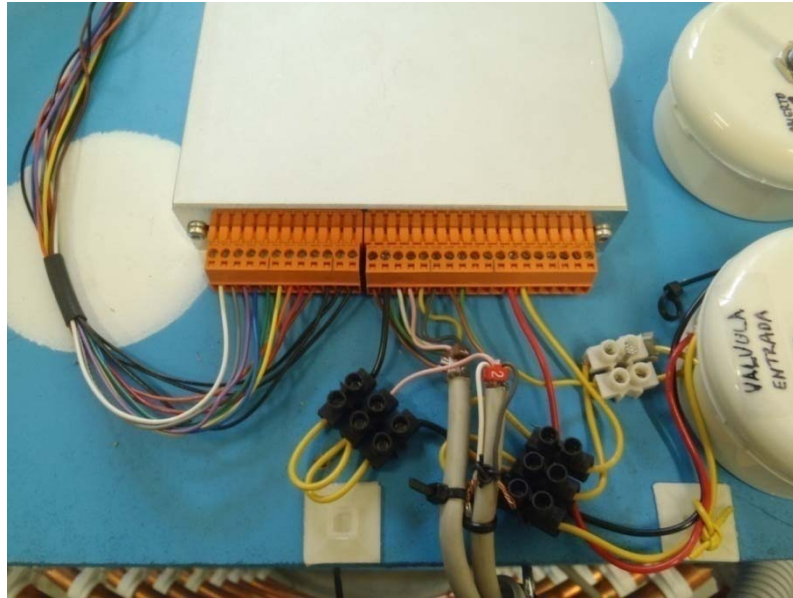


Figura 7.34. Detalle conexiones en la tarjeta que controla la electroválvula

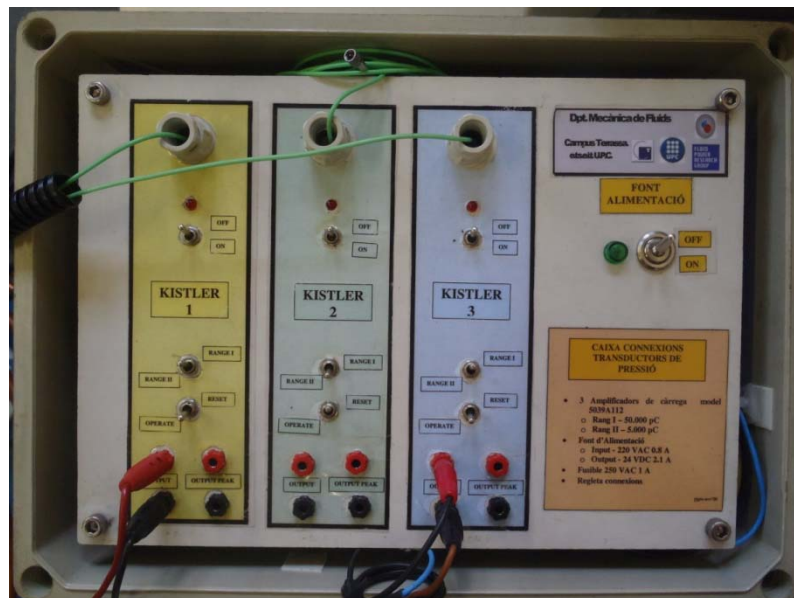


Figura 7.35. Caja conexiones y maniobra transductores de presión *Kistler*®

En la Figura 7.36 se muestra el transductor de presión Kistler® instalado en uno de los bloques con orificios, y en la Figura 7.37 se muestra un transmisor de

presión VDO® instalado en uno de los bloques con orificios. La Figura 7.38 muestra ambos tipos de sensor instalados en el mismo bloque de orificios.



Figura 7.36. Transductor de presión *Kistler*® instalado



Figura 7.37. Transmisor de presión *VDO*® instalado

En la Figura 7.39 se observa el conmutador para el control manual o bien mediante *LabView*® de la señal de control de la electroválvula (izq) y el potenciómetro para el control manual de la apertura de la electroválvula (dcha).



Figura 7.38. Sensores de presión VDO® y Kistler® instalados

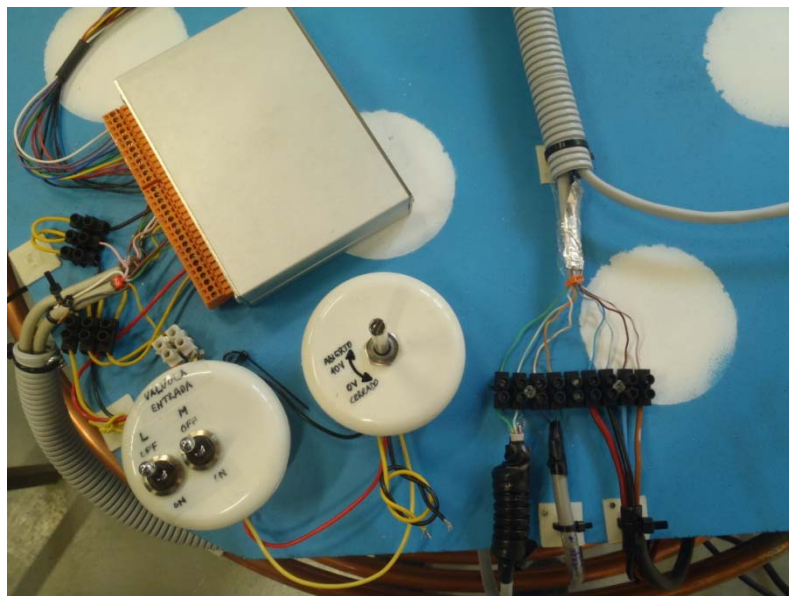


Figura 7.39. Conmutador control LabView®/manual de la electroválvula

En la Figura 7.40 se muestra el conmutador de las señales VDO 1 y VDO 2 utilizado durante la fase de pruebas.

La Figura 7.41 muestra la válvula de bola manual instalada en el extremo final del tramo de tubería.



Figura 7.40. Conmutador de las señales VDO 1 y VDO 2, fase de pruebas

El depósito acumulador utilizado como suministro de aire a presión para el banco de pruebas se muestra en la Figura 7.42. La tubería azul de la derecha suministra el aire a la electroválvula.



Figura 7.41. Válvula de bola manual en el extremo final de la tubería

La fuente de alimentación de 24 VDC que alimenta la electroválvula se muestra en la parte superior de la Figura 7.43, junto con el ordenador utilizado.



Figura 7.42. Depósito acumulador para suministro de aire a presión



Figura 7.43. Fuente de alimentación 24 VDC y ordenador utilizado

La Figura 7.44 muestra una perspectiva general del banco de pruebas completo con todos sus componentes.



Figura 7.44. Perspectiva general del banco de pruebas

7.4 Definición de los ensayos

7.4.1 Localización mediante un método acústico

Se describe en este apartado los ensayos propuestos para corroborar experimentalmente el estudio teórico de K. Watanabe (1) expuesto en el apartado 5.3.

Los ensayos se plantean considerando las siguientes variables del banco de pruebas como factores de control:

- valor medio V_V de la señal de control en tensión de la electroválvula *Matrix*®
- la posición de la fuga, según la nomenclatura de la Tabla 5.3
- el grado de estrechamiento de la sección de tubería en el extremo final, expresado como % de apertura de la válvula de la salida sobre la sección total
- la presión en la salida del depósito acumulador P_{ACUM} que alimenta con aire comprimido la instalación
- el caudal de fuga $q_f(t)$ en $[sl/min]$, controlado mediante la válvula manual a la salida del caudalímetro instalado

Las respuestas observadas serán las siguientes variables del banco de pruebas:

- presión al inicio de la tubería $p_i(t)$
- presión al final de la tubería $p_o(t)$

El ensayo requiere de fluctuaciones aleatorias del tipo ruido blanco, acorde a la simplificación asumida en el apartado 5.3. Este ruido blanco se asume que se genera de manera natural por la rugosidad de la tubería con el flujo de aire circulante. Para añadir mayor ruido se induce en $p_i(t)$ un rizado a partir de la señal de control en tensión de la electroválvula *Matrix*®. En todos los ensayos este rizado se genera con una señal de control de onda cuadrada, con una amplitud de pico a pico de 0.40 V en tensión y con un periodo de rizado de 0.02 segundos. Estos valores se pueden modificar por el usuario desde el *panel de control* del instrumento virtual programado con *LabView*®.

Los ensayos propuestos se muestran resumidos en la Tabla 7.6.

Ensayo	Factores de control					Amplitud de rizado	Periodo de rizado	Código ensayo
	Posición de la fuga	Apertura válvula salida	Presión de alimentación P _{ACUM}	Caudal de fuga	Tensión V _v válvula Matrix®			
		[%]	[bar]	[l / min]	[V]	[V]	[s]	
1	3+	25	3	0	5	0,40	0,02	pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga0SLPMtensValv5V
2	3+	25	3	0	8	0,40	0,02	pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga0SLPMtensValv8V
3	3+	25	3	36	5	0,40	0,02	pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga36SLPMtensValv5V
4	3+	25	3	36	8	0,40	0,02	pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga36SLPMtensValv8V
5	3+	25	3	62	5	0,40	0,02	pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga62SLPMtensValv5V
6	3+	25	3	62	8	0,40	0,02	pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga62SLPMtensValv8V
7	3+	25	5	0	5	0,40	0,02	pos3pValSalAp25Pacum5Qfuga0SLPMtensValv5V
8	3+	25	5	0	8	0,40	0,02	pos3pValSalAp25Pacum5Qfuga0SLPMtensValv8V
9	3+	25	5	36	5	0,40	0,02	pos3pValSalAp25Pacum5Qfuga36SLPMtensValv5V
10	3+	25	5	36	8	0,40	0,02	pos3pValSalAp25Pacum5Qfuga36SLPMtensValv8V
11	3+	25	5	62	5	0,40	0,02	pos3pValSalAp25Pacum5Qfuga62SLPMtensValv5V
12	3+	25	5	62	8	0,40	0,02	pos3pValSalAp25Pacum5Qfuga62SLPMtensValv8V
13	3+	0	3	0	5	0,40	0,02	pos3pValSalAp0Pacum3Qfuga0SLPMtensValv5V
14	3+	0	3	0	8	0,40	0,02	pos3pValSalAp0Pacum3Qfuga0SLPMtensValv8V
15	3+	0	3	36	5	0,40	0,02	pos3pValSalAp0Pacum3Qfuga36SLPMtensValv5V
16	3+	0	3	36	8	0,40	0,02	pos3pValSalAp0Pacum3Qfuga36SLPMtensValv8V
17	3+	0	3	62	5	0,40	0,02	pos3pValSalAp0Pacum3Qfuga62SLPMtensValv5V
18	3+	0	3	62	8	0,40	0,02	pos3pValSalAp0Pacum3Qfuga62SLPMtensValv8V
19	3+	0	5	0	5	0,40	0,02	pos3pValSalAp0Pacum5Qfuga0SLPMtensValv5V
20	3+	0	5	0	8	0,40	0,02	pos3pValSalAp0Pacum5Qfuga0SLPMtensValv8V
21	3+	0	5	36	5	0,40	0,02	pos3pValSalAp0Pacum5Qfuga36SLPMtensValv5V
22	3+	0	5	36	8	0,40	0,02	pos3pValSalAp0Pacum5Qfuga36SLPMtensValv8V
23	3+	0	5	62	5	0,40	0,02	pos3pValSalAp0Pacum5Qfuga62SLPMtensValv5V
24	3+	0	5	62	8	0,40	0,02	pos3pValSalAp0Pacum5Qfuga62SLPMtensValv8V
25	3-	25	3	0	5	0,40	0,02	pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga0SLPMtensValv5V
26	3-	25	3	0	8	0,40	0,02	pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga0SLPMtensValv8V
27	3-	25	3	36	5	0,40	0,02	pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga36SLPMtensValv5V
28	3-	25	3	36	8	0,40	0,02	pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga36SLPMtensValv8V
29	3-	25	3	62	5	0,40	0,02	pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga62SLPMtensValv5V
30	3-	25	3	62	8	0,40	0,02	pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga62SLPMtensValv8V
31	3-	25	5	0	5	0,40	0,02	pos3pValSalAp25Pacum5Qfuga0SLPMtensValv5V
32	3-	25	5	0	8	0,40	0,02	pos3pValSalAp25Pacum5Qfuga0SLPMtensValv8V
33	3-	25	5	36	5	0,40	0,02	pos3pValSalAp25Pacum5Qfuga36SLPMtensValv5V
34	3-	25	5	36	8	0,40	0,02	pos3pValSalAp25Pacum5Qfuga36SLPMtensValv8V
35	3-	25	5	62	5	0,40	0,02	pos3pValSalAp25Pacum5Qfuga62SLPMtensValv5V
36	3-	25	5	62	8	0,40	0,02	pos3pValSalAp25Pacum5Qfuga62SLPMtensValv8V
37	3-	0	3	0	5	0,40	0,02	pos3pValSalAp0Pacum3Qfuga0SLPMtensValv5V
38	3-	0	3	0	8	0,40	0,02	pos3pValSalAp0Pacum3Qfuga0SLPMtensValv8V
39	3-	0	3	36	5	0,40	0,02	pos3pValSalAp0Pacum3Qfuga36SLPMtensValv5V
40	3-	0	3	36	8	0,40	0,02	pos3pValSalAp0Pacum3Qfuga36SLPMtensValv8V
41	3-	0	3	62	5	0,40	0,02	pos3pValSalAp0Pacum3Qfuga62SLPMtensValv5V
42	3-	0	3	62	8	0,40	0,02	pos3pValSalAp0Pacum3Qfuga62SLPMtensValv8V
43	3-	0	5	0	5	0,40	0,02	pos3pValSalAp0Pacum5Qfuga0SLPMtensValv5V
44	3-	0	5	0	8	0,40	0,02	pos3pValSalAp0Pacum5Qfuga0SLPMtensValv8V
45	3-	0	5	36	5	0,40	0,02	pos3pValSalAp0Pacum5Qfuga36SLPMtensValv5V
46	3-	0	5	36	8	0,40	0,02	pos3pValSalAp0Pacum5Qfuga36SLPMtensValv8V
47	3-	0	5	62	5	0,40	0,02	pos3pValSalAp0Pacum5Qfuga62SLPMtensValv5V
48	3-	0	5	62	8	0,40	0,02	pos3pValSalAp0Pacum5Qfuga62SLPMtensValv8V
49	2-	25	3	0	5	0,40	0,02	pos2pValSalAp25Pacum3Qfuga0SLPMtensValv5V
50	2-	25	3	0	8	0,40	0,02	pos2pValSalAp25Pacum3Qfuga0SLPMtensValv8V
51	2-	25	3	36	5	0,40	0,02	pos2pValSalAp25Pacum3Qfuga36SLPMtensValv5V
52	2-	25	3	36	8	0,40	0,02	pos2pValSalAp25Pacum3Qfuga36SLPMtensValv8V
53	2-	25	3	62	5	0,40	0,02	pos2pValSalAp25Pacum3Qfuga62SLPMtensValv5V
54	2-	25	3	62	8	0,40	0,02	pos2pValSalAp25Pacum3Qfuga62SLPMtensValv8V
55	2-	25	5	0	5	0,40	0,02	pos2pValSalAp25Pacum5Qfuga0SLPMtensValv5V
56	2-	25	5	0	8	0,40	0,02	pos2pValSalAp25Pacum5Qfuga0SLPMtensValv8V
57	2-	25	5	36	5	0,40	0,02	pos2pValSalAp25Pacum5Qfuga36SLPMtensValv5V
58	2-	25	5	36	8	0,40	0,02	pos2pValSalAp25Pacum5Qfuga36SLPMtensValv8V
59	2-	25	5	62	5	0,40	0,02	pos2pValSalAp25Pacum5Qfuga62SLPMtensValv5V
60	2-	25	5	62	8	0,40	0,02	pos2pValSalAp25Pacum5Qfuga62SLPMtensValv8V
61	2-	0	3	0	5	0,40	0,02	pos2pValSalAp0Pacum3Qfuga0SLPMtensValv5V
62	2-	0	3	0	8	0,40	0,02	pos2pValSalAp0Pacum3Qfuga0SLPMtensValv8V
63	2-	0	3	36	5	0,40	0,02	pos2pValSalAp0Pacum3Qfuga36SLPMtensValv5V
64	2-	0	3	36	8	0,40	0,02	pos2pValSalAp0Pacum3Qfuga36SLPMtensValv8V
65	2-	0	3	62	5	0,40	0,02	pos2pValSalAp0Pacum3Qfuga62SLPMtensValv5V
66	2-	0	3	62	8	0,40	0,02	pos2pValSalAp0Pacum3Qfuga62SLPMtensValv8V
67	2-	0	5	0	5	0,40	0,02	pos2pValSalAp0Pacum5Qfuga0SLPMtensValv5V
68	2-	0	5	0	8	0,40	0,02	pos2pValSalAp0Pacum5Qfuga0SLPMtensValv8V
69	2-	0	5	36	5	0,40	0,02	pos2pValSalAp0Pacum5Qfuga36SLPMtensValv5V
70	2-	0	5	36	8	0,40	0,02	pos2pValSalAp0Pacum5Qfuga36SLPMtensValv8V
71	2-	0	5	62	5	0,40	0,02	pos2pValSalAp0Pacum5Qfuga62SLPMtensValv5V
72	2-	0	5	62	8	0,40	0,02	pos2pValSalAp0Pacum5Qfuga62SLPMtensValv8V

Tabla 7.6. Ensayos propuestos para la localización de fugas mediante un método acústico

7.4.2 Ensayo de fuga en tubería presurizada sin caudal

Se define en este apartado un ensayo adicional consistente en presurizar la tubería del banco de pruebas y, manteniendo la válvula de salida y de entrada cerradas, originar una fuga hasta despresurizar completamente la tubería. El objetivo final es la medición de las presiones en los extremos inicial y final de la tubería durante el tiempo de despresurización y observar en el dominio frecuencial la relación entre las transformadas de Fourier de la presión en el extremo inicial y de la presión en el extremo final, y tratar de inferir a partir de ésta una relación con la existencia de la fuga y con su localización.

El ensayo se realiza fijando los siguientes valores en los factores de control

- valor medio V_V de la señal de control en tensión de la electroválvula *Matrix®* de 0 V , esto es cerrada
- % de apertura de la válvula de la salida sobre la sección total del 0%
- presurizado de la tubería hasta una presión relativa de 5 bar

Las localizaciones de las fugas simuladas serán la posición PO 2- y PO 3+, según la nomenclatura de la Tabla 5.3, dando lugar a los códigos de ensayo 'pos2nValSalAp0Pacum5Qfuga36SLPMtensValv0V_fugapresurizada' y 'pos3pValSalAp0Pacum5Qfuga36SLPMtensValv0V_fugapresurizada' respectivamente.

Las respuestas observadas en este caso serán las siguientes variables del banco de pruebas:

- presión al inicio de la tubería $p_i(t)$
- presión al final de la tubería $p_o(t)$

Con las lecturas de éstas se operará de la misma manera que para los ensayos del apartado 7.4.1, calculando la función respuesta $g(t)$.

8 DESARROLLO Y RESULTADOS

8.1 Localización mediante un método acústico

8.1.1 Procesado de datos

Para el procesado de datos se ha utilizado el software *MATLAB*®. Se ha elaborado el archivo *Watanabe.m* en el que se han programado las operaciones sobre las muestras temporales de las variables $p_i(t)$ y $p_o(t)$. En el encabezamiento se editan los parámetros comunes a todos los ensayos y el código o nombre de cada ensayo a procesar. El archivo *Watanabe.m* lee el archivo *datos.txt* generado por *MATLAB*® donde se encuentran los resultados de las lecturas realizadas por el banco de pruebas y procesa la información, despreciando el 10% de las lecturas del inicio y del final del ensayo, para eliminar transitorios, y componiendo las presiones estáticas dadas por los transmisores *VDO*® con las dinámicas dadas por los transductores *Kistler*® y calculando las transformadas rápidas de Fourier de los vectores de presiones en el inicio y el final de la tubería. Posteriormente calcula su cociente y aplica la transformada inversa rápida de Fourier a la componente real de éste, lo que equivale a aplicar la transformada inversa coseno a la variable compleja. De esta manera se obtiene un vector $g(t)$ que contiene los valores ordenados para cada uno de los tiempos discretos. Esta función es la que se debe graficar en el intervalo de tiempo de 0 a L/C segundos. Para el banco de pruebas concreto $L = 20\text{ m}$ y $C = 344\text{ m/s}$, por lo que el intervalo de tiempo será de 0 a 0.058 segundos. La gráfica estará formada por los valores discretos de 58 puntos dado que el intervalo de tiempo de muestreo tomado fue de 0.001 segundos.

El código del archivo *Watanabe.m* se muestra a continuación.

```
% NOMBRE Y PARÁMETROS DEL ENSAYO (editar cada vez)
L=20; % en m, longitud total tubería
C=344; % en m/s, velocidad sonido en el fluido
sampleinterval=0.001; % intervalo de tiempo de muestreo, en
segundos
ensayo='escribir aquí el código del ensayo'; % nombre de la
carpeta
%% INICIO PREPROCESO DE DATOS
% Cargamos los ficheros de datos escritos por la tarjeta PCI-1200
% El archivo 'datos.txt' contiene cuatro columnas.
% Primera columna-> presión Kistler1(inicio tubería)
% Segunda columna-> presión Kistler3(final tubería)
% Tercera columna-> presión VDO1(inicio tubería)-primera mitad de
valores
% Cuarta columna-> presión VDO2(final tubería)-segunda mitad de
valores
datos = load('datos.txt');
p_kistler_1 = datos(:,1);
```

```
p_kistler_3 = datos(:,2);
p_vdo1 = datos(:,3);
p_vdo2 = datos(:,4);
clear datos;
n_samplefull = length(p_vdo1); %numero de muestras total

%Sumamos presiones de sensores VDO y KISTLER (_st indica 'sin
truncar'))
p_inicio_st = p_vdo1 + p_kistler_1;
p_final_st = p_vdo2 + p_kistler_3;
p_inicio_st = p_inicio_st';
p_final_st = p_final_st';

% Truncamos el 10% por delante y por detrás de los datos para
eliminar
% transitorios, y calculo del número de muestras finalmente
utilizadas
N = floor(n_samplefull*0.8); % N número muestras finalmente
utilizadas
t_ensayo = (N-1)*sampleinterval; % tiempo de ensayo finalmente
utilizado
for k=1:N
    p_inicio(k) = p_inicio_st(k+floor(N*0.1)-1);
    p_final(k) = p_final_st(k+floor(N*0.1)-1);
end
% Finalmente tengo en p_inicio y en p_final los datos de las
presiones
% a utilizar según artículo Watanabe. Vectores de N componentes.
% FINAL PREPROCESO DE DATOS
%% INICIO 'FAST FOURIER TRANSFORM' DE PRESIONES INICIAL Y FINAL ->
G(iw)
Fs = 1/sampleinterval;           % Frecuencia de muestreo
T = sampleinterval;              % Intervalo tiempo de muestreo
Lsignal = N;                     % Longitud de la señal
NFFT = 2^nextpow2(Lsignal);      % Siguiendo potencia de 2 a partir
de la                             % longitud de la señal Lsignal

(para                               % mejorar el cálculo de FFT)
timevector = (0:Lsignal-1)*T;    % Vector de tiempo extendido
delta_f = Fs/(NFFT-1);           % Incremento de frecuencia
f=0:delta_f:FsWith/2;           % Vector de frecuencias de 0 a la
frec de Nyquist
f_ang=f*2*pi;                    % Vector de frecuencias angulares
según f
%fft de las presiones (indicadas en mayúsculas 'P')
P_inicio = fft(p_inicio,NFFT); % fft presiones inicio
P_final = fft(p_final, NFFT); % fft presiones final
%Gráfica de la fft de las presiones al inicio de la tubería
figure(1)
plot(f,abs(P_inicio(1:length(f))), 'r', 'linewidth',0.5)
whitebg([214/255,214/255,214/255]);
grid on;
title(strcat('Nombre del ensayo: ', ensayo, '; |Pinicial|'));
xlabel('frec(Hz)');
ylabel('|Pi|');
%Gráfica de la fft de las presiones al final de la tubería
figure(2)
```



```

plot(f,abs(P_final(1:length(f))), 'r', 'linewidth',0.5)
whitebg([214/255,214/255,214/255]);
grid on;
title(strcat('Nombre del ensayo: ', ensayo, '; |Pfinal|'));
xlabel('frec(Hz)');
ylabel('|Pf|');

% Cálculo del cociente de fft's de las presiones inicial y final
% G_tilde = cociente de P_inicio y P_final
for k=1:NFFT
    G_tilde(1,k) = P_inicio(1,k) / P_final(1,k); %componente a
componente
end
% Gráfica de la parte real de G_tilde (en el dominio de las frec
ang)
figure(3)
plot(f_ang,real(G_tilde(1:length(f_ang))), 'r', 'linewidth',0.5)
whitebg([214/255,214/255,214/255]);
grid on;
title(strcat('Nombre del ensayo: ', ensayo, '; Re(G
tilde(w))'));
xlabel('frec ang(rad/s)');
ylabel('Re(G tilde(w))');
% Cálculo de la función ventana de G
% Primero: cálculo de G_barra !!!!!
% G_tilde(m-5), G_tilde(m-4), etc. cuando 'm' es 1,2,...!
% obs: las 5 primeras y últimas componentes no las 'suavizo' con
la
% función ventana por no estar definidas en (m-5),...etc o
(m+5),...etc.
G_barra(1)=(1/429)*(...
    -36*(0+G_tilde(1+5))...
    +9*(0+G_tilde(1+4))...
    +44*(0+G_tilde(1+3))...
    +69*(0+G_tilde(1+2))...
    +84*(0+G_tilde(1+1))...
    +89*G_tilde(1)...
);
G_barra(2)=(1/429)*(...
    -36*(0+G_tilde(2+5))...
    +9*(0+G_tilde(2+4))...
    +44*(0+G_tilde(2+3))...
    +69*(0+G_tilde(2+2))...
    +84*(G_tilde(2-1)+G_tilde(2+1))...
    +89*G_tilde(2)...
);
G_barra(3)=(1/429)*(...
    -36*(0+G_tilde(3+5))...
    +9*(0+G_tilde(3+4))...
    +44*(0+G_tilde(3+3))...
    +69*(G_tilde(3-2)+G_tilde(3+2))...
    +84*(G_tilde(3-1)+G_tilde(3+1))...
    +89*G_tilde(3)...
);
G_barra(4)=(1/429)*(...
    -36*(0+G_tilde(4+5))...
    +9*(0+G_tilde(4+4))...
    +44*(G_tilde(4-3)+G_tilde(4+3))...
    +69*(G_tilde(4-2)+G_tilde(4+2))...

```

```

+84*(G_tilde(4-1)+G_tilde(4+1)) ...
+89*G_tilde(4) ...
);
G_barra(5)=(1/429)*( ...
-36*(0+G_tilde(5+5)) ...
+9*(G_tilde(5-4)+G_tilde(5+4)) ...
+44*(G_tilde(5-3)+G_tilde(5+3)) ...
+69*(G_tilde(5-2)+G_tilde(5+2)) ...
+84*(G_tilde(5-1)+G_tilde(5+1)) ...
+89*G_tilde(5) ...
);
for m=6:NFFT-5
    G_barra(m)=(1/429)*( ...
-36*(G_tilde(m-5)+G_tilde(m+5)) ...
+9*(G_tilde(m-4)+G_tilde(m+4)) ...
+44*(G_tilde(m-3)+G_tilde(m+3)) ...
+69*(G_tilde(m-2)+G_tilde(m+2)) ...
+84*(G_tilde(m-1)+G_tilde(m+1)) ...
+89*G_tilde(m) ...
);
end
G_barra(NFFT)=(1/429)*( ...
-36*(G_tilde(NFFT-5)+0) ...
+9*(G_tilde(NFFT-4)+0) ...
+44*(G_tilde(NFFT-3)+0) ...
+69*(G_tilde(NFFT-2)+0) ...
+84*(G_tilde(NFFT-1)+0) ...
+89*G_tilde(NFFT) ...
);
G_barra(NFFT-1)=(1/429)*( ...
-36*(G_tilde(NFFT-1-5)+0) ...
+9*(G_tilde(NFFT-1-4)+0) ...
+44*(G_tilde(NFFT-1-3)+0) ...
+69*(G_tilde(NFFT-1-2)+0) ...
+84*(G_tilde(NFFT-1-1)+G_tilde(NFFT-
1+1)) ...
+89*G_tilde(NFFT-1) ...
);
G_barra(NFFT-2)=(1/429)*( ...
-36*(G_tilde(NFFT-2-5)+0) ...
+9*(G_tilde(NFFT-2-4)+0) ...
+44*(G_tilde(NFFT-2-3)+0) ...
+69*(G_tilde(NFFT-2-2)+G_tilde(NFFT-
2+2)) ...
+84*(G_tilde(NFFT-2-1)+G_tilde(NFFT-
2+1)) ...
+89*G_tilde(NFFT-2) ...
);
G_barra(NFFT-3)=(1/429)*( ...
-36*(G_tilde(NFFT-3-5)+0) ...
+9*(G_tilde(NFFT-3-4)+0) ...
+44*(G_tilde(NFFT-3-3)+G_tilde(NFFT-
3+3)) ...
+69*(G_tilde(NFFT-3-2)+G_tilde(NFFT-
3+2)) ...
+84*(G_tilde(NFFT-3-1)+G_tilde(NFFT-
3+1)) ...
+89*G_tilde(NFFT-3) ...
);

```

```

G_barra(NFFT-4)=(1/429)*(...
                    -36*(G_tilde(NFFT-4-5)+0)...
                    +9*(G_tilde(NFFT-4-4)+G_tilde(NFFT-
4+4))...
                    +44*(G_tilde(NFFT-4-3)+G_tilde(NFFT-
4+3))...
                    +69*(G_tilde(NFFT-4-2)+G_tilde(NFFT-
4+2))...
                    +84*(G_tilde(NFFT-4-1)+G_tilde(NFFT-
4+1))...
                    +89*G_tilde(NFFT-4)...
                    );

% Gráfica de la parte real de G_barra (en el dominio de las frec
ang)
figure(4)
plot(f_ang,real(G_barra(1:length(f_ang))), 'r', 'linewidth',0.5)
whitebg([214/255,214/255,214/255]);
grid on;
title(strcat('Nombre del ensayo: ', ensayo, ';    Re(G
barra(w))'));
xlabel('frec ang(rad/s)');
ylabel('Re(G barra(w))');

% Segundo: cálculo de G_gorro !!!!!
for m=1:NFFT
    if (abs(G_tilde(1,m))>=2*abs(G_barra(1,m)))
        G_gorro(1,m)=G_barra(1,m);
    else
        G_gorro(1,m)=G_tilde(1,m);
    end
end

% Gráfica de la parte real de G_gorro (en el dominio de las frec
ang)
figure(5)
plot(f_ang,real(G_gorro(1:length(f_ang))), 'r', 'linewidth',0.5)
whitebg([214/255,214/255,214/255]);
grid on;
title(strcat('Nombre del ensayo: ', ensayo, ';    Re(G
gorro(w))'));
xlabel('frec ang(rad/s)');
ylabel('Re(G gorro(w))');
% a partir de ahora se trabaja con G_gorro como la
% funcion DFT(p_inic)/DFT(p_final) ya suavizada (operación
ventana)
% FINAL 'FAST FOURIER TRANSFORM' DE LAS PRESIONES INICIAL Y FINAL
%% CÁLCULO DE LA FUNCIÓN RESPUESTA g(t)
% Para el cálculo de g(t) como la transformada inversa coseno de
G_gorro
% se toma la parte real de ésta y se le aplica la inverse fast
Fourier
% transform, lo cual es equivalente
G=real(G_gorro);

% Gráfica de G(iw) (deber ser una función tipo coseno amortiguada
% según Fig.2 artículo Watanabe)
figure(6)

```

```
plot(f_ang,G(1:length(f_ang)),'r','linewidth',0.5)
whitebg([214/255,214/255,214/255]);
grid on;
title(strcat('Nombre del ensayo: ', ensayo, ';    G(w)'));
xlabel('frec ang(rad/s)');
ylabel('G(w)');

% Intervalo de integracion de la IDCT
winf=0;
wsup=56.7*pi()*C/L;
% No necesario estos límites ya que se integra implícitamente
entre
% éstos porque el intervalo de tiempo de muestreo impide que
w>wsup

g = ifft(G); % calculo Inverse discrete cosine como la ifft de la
parte real de G

% Inicio gráfica de g(t)
% Gráfica respuesta 't vs g(t)' sólo de los 'L/C' primeros
segundos
figure(7)
plot(timevector(1:floor((L/C)/T)+1),g(1:floor((L/C)/T)+1),'r',
'linewidth',2)
whitebg([214/255,214/255,214/255]);
grid on;
title(strcat('Nombre del ensayo: ', ensayo, ';    g(t) intervalo
t=[0,L/C]')); % strcat concatenar
xlabel('t(s)');
ylabel('g(t)');
% Final gráfica de g(t)
```

8.1.2 Resultados obtenidos

Se presentan a continuación, tan solo y por motivos de extensión, las lecturas realizadas en dos de los ensayos propuestos, en las mismas condiciones uno con fuga en el orificio PO 3+ situado a una distancia desde el inicio de 6.62 m y el otro sin fuga. Los códigos de estos ensayos son 'pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga36SLPMtensValv5V' para el que tiene fuga y 'pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga0SLPMtensValv5V' para el que no tiene.

Las gráficas proporcionadas por *LabView®* para cada uno de ellos se muestran en la Figura 8.1 y la Figura 8.2, para los casos con fuga y sin fuga respectivamente, en el intervalo de tiempo de 19 y 21 segundos para mayor detalle.



Figura 8.1. Lecturas de uno de los ensayos con fuga en PO 3+

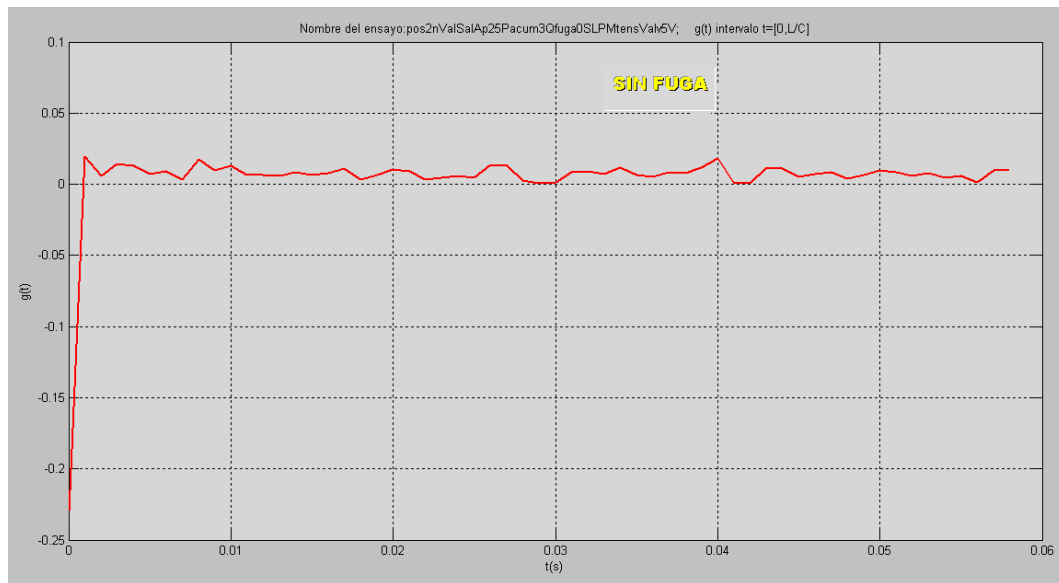


Figura 8.2. Lecturas de uno de los ensayos sin fuga

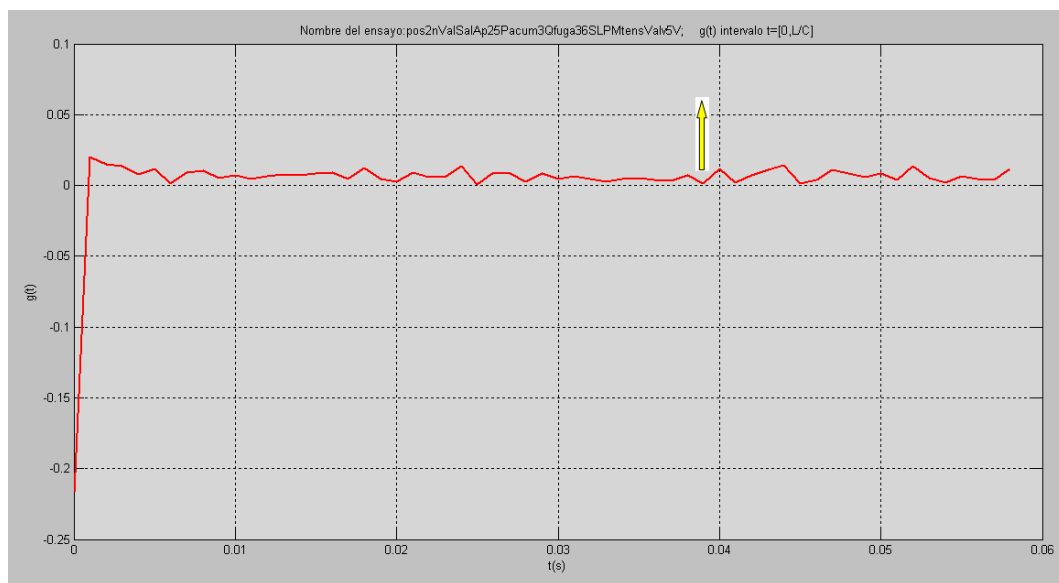
El cálculo de las gráficas de la función $g(t)$ obtenidas mediante *MATLAB*® se muestran en los siguientes apartados a continuación, indicándose con una flecha el pico teórico que deberían presentar y su sentido positivo o negativo en los casos que existe fuga real. En los casos sin fuga también se indica.

8.1.2.1 Fuga en posición PO 2-

Las gráficas de la función $g(t)$ para la posición PO 2- deberían darse para un tiempo de 0.038 segundos, indicado con una flecha. Las Figura 8.3 y Figura 8.4 muestran $g(t)$ para el caso sin fuga y con fuga respectivamente, con una tensión de control de la electroválvula de 5 V y una presión a la salida del acumulador de 3 bar, y la válvula de salida abierta un 25%.

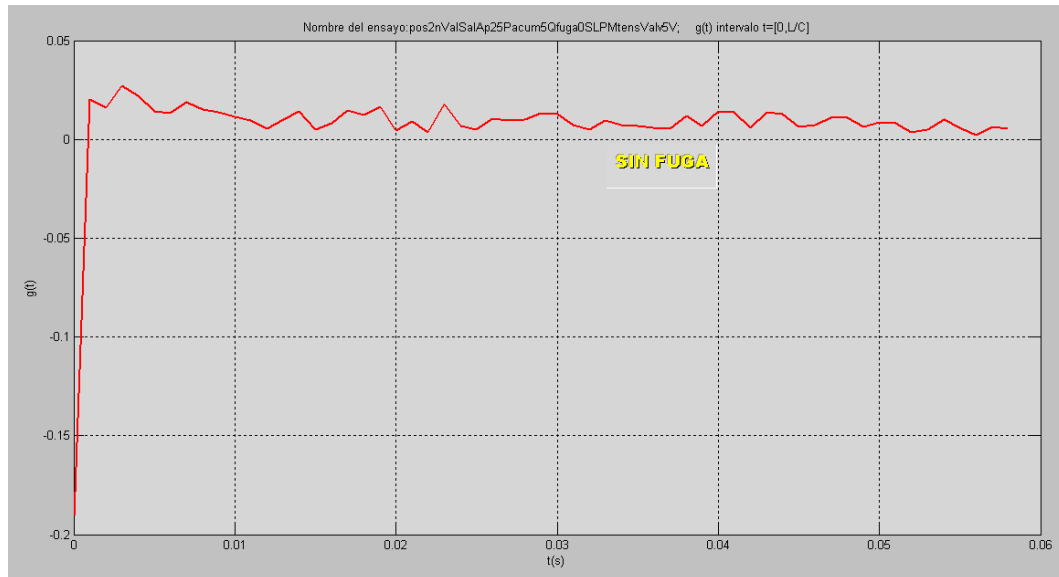


**Figura 8.3. Función $g(t)$ ensayo
pos2nValSalAp25Pacum3Qfuga0SLPMtensValv5V**

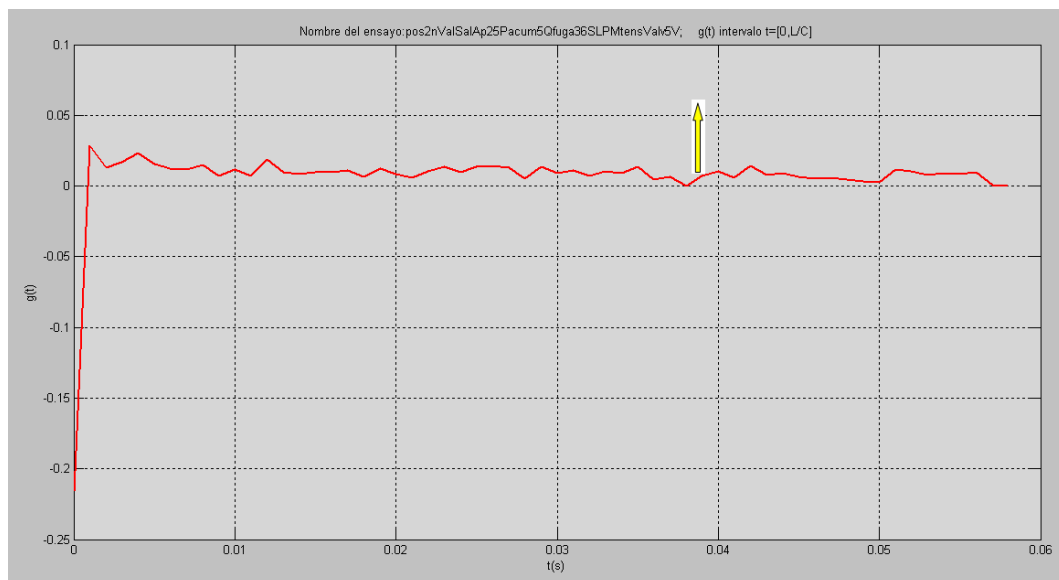


**Figura 8.4. Función $g(t)$ ensayo
pos2nValSalAp25Pacum3Qfuga36SLPMtensValv5V**

Las Figura 8.5 y Figura 8.6 muestran la función $g(t)$ para el caso sin fuga y con fuga respectivamente, con una tensión de control de la electroválvula de 5 V y una presión a la salida del acumulador de 5 bar, y la válvula de salida abierta un 25%.

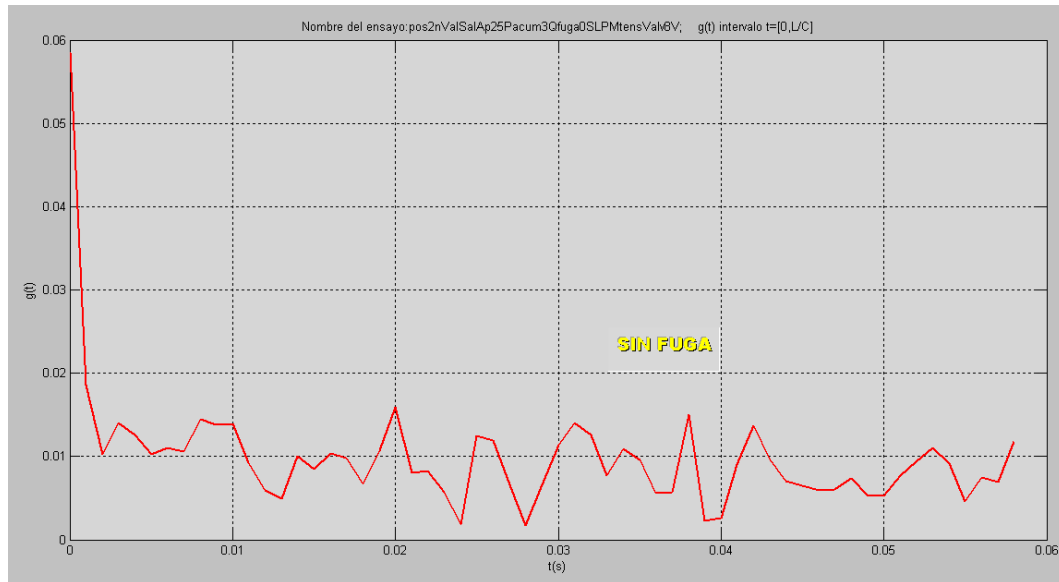


**Figura 8.5. Función $g(t)$ ensayo
pos2nValSalAp25Pacum5Qfuga0SLPMtensValv5V**

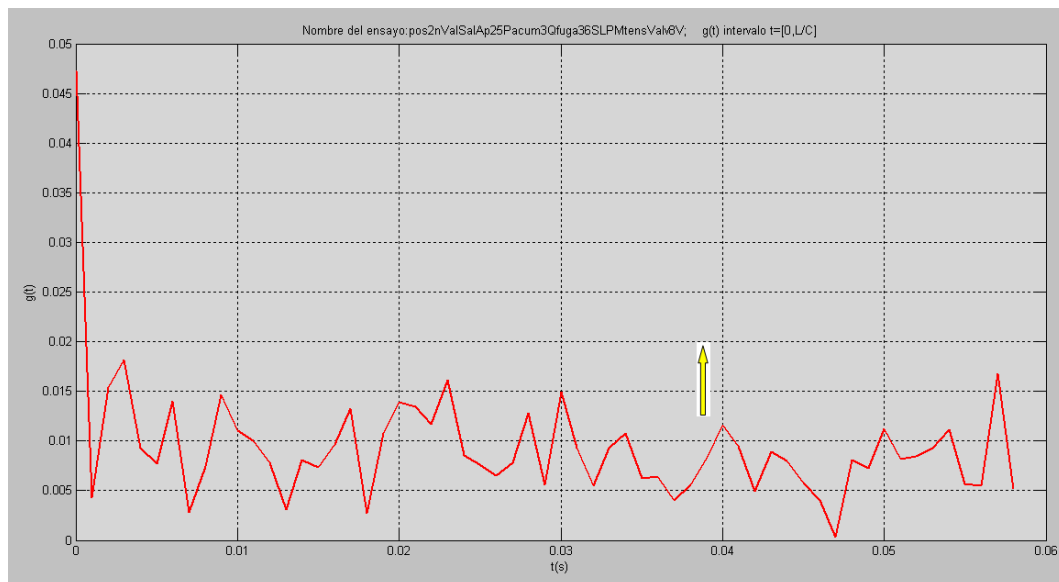


**Figura 8.6. Función $g(t)$ ensayo
pos2nValSalAp25Pacum5Qfuga36SLPMtensValv5V**

Las Figura 8.7 y Figura 8.8 muestran la función $g(t)$ para el caso sin fuga y con fuga respectivamente, con una tensión de control de la electroválvula de 8 V y una presión a la salida del acumulador de 3 bar, y la válvula de salida abierta un 25%.

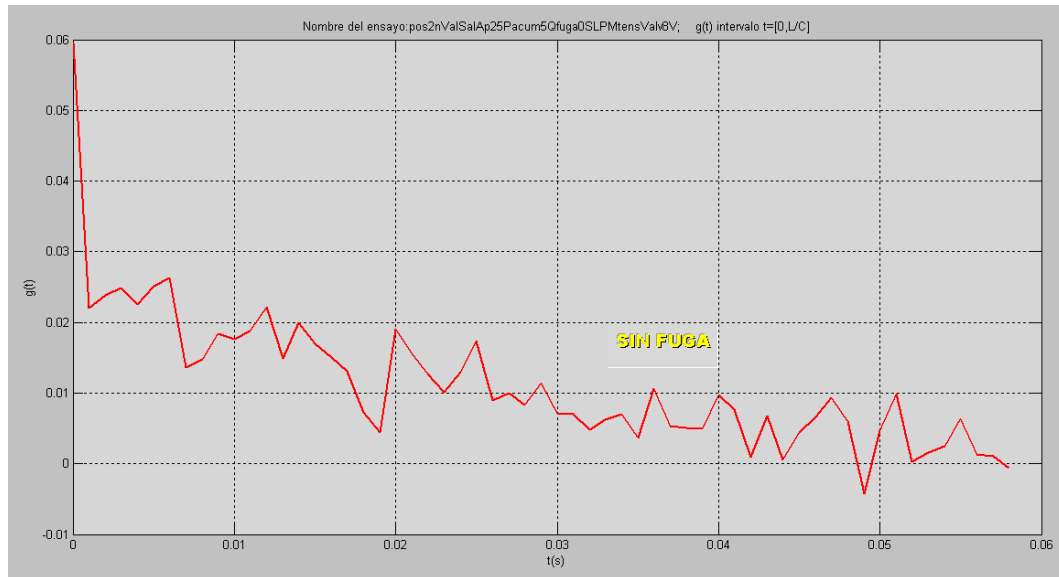


**Figura 8.7. Función $g(t)$ ensayo
pos2nValSalAp25Pacum3Qfuga0SLPMtensValv8V**

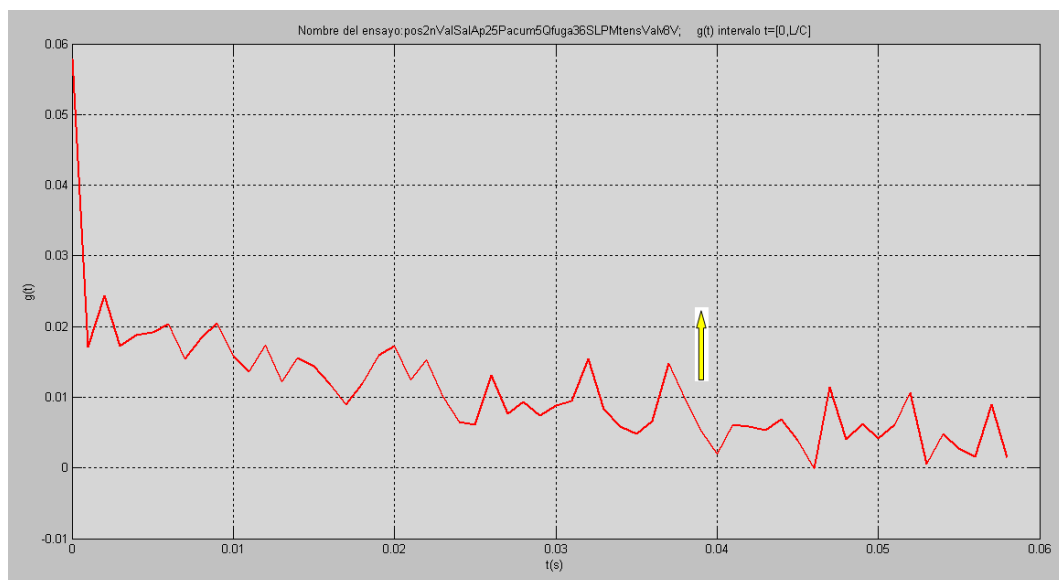


**Figura 8.8. Función $g(t)$ ensayo
pos2nValSalAp25Pacum3Qfuga36SLPMtensValv8V**

Las Figura 8.9 y Figura 8.10 muestran la función $g(t)$ para el caso sin fuga y con fuga respectivamente, con una tensión de control de la electroválvula de 8 V y una presión a la salida del acumulador de 5 bar, y la válvula de salida abierta un 25%.



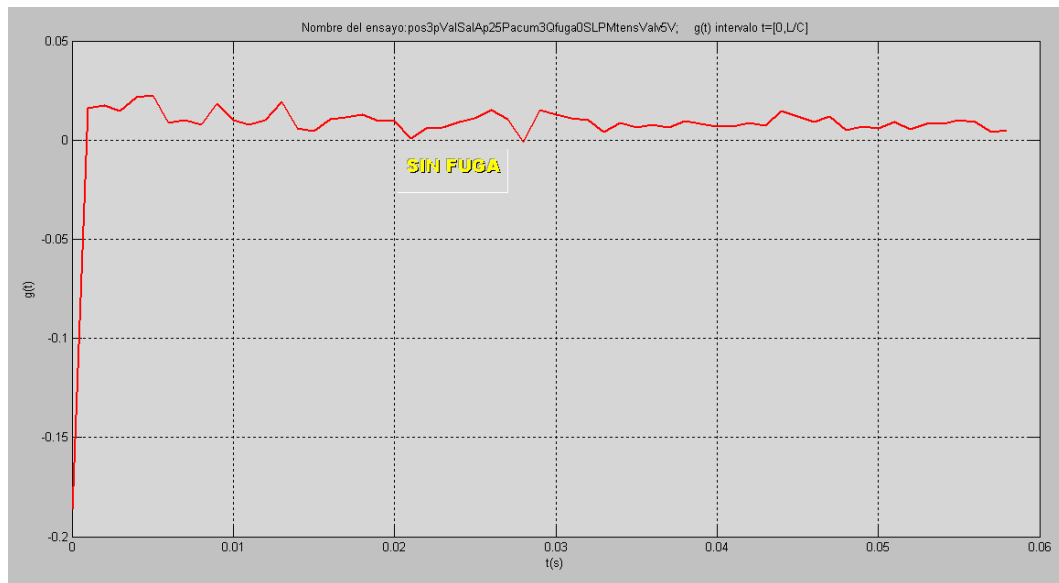
**Figura 8.9. Función $g(t)$ ensayo
pos2nValSalAp25Pacum5Qfuga0SLPMtensValv8V**



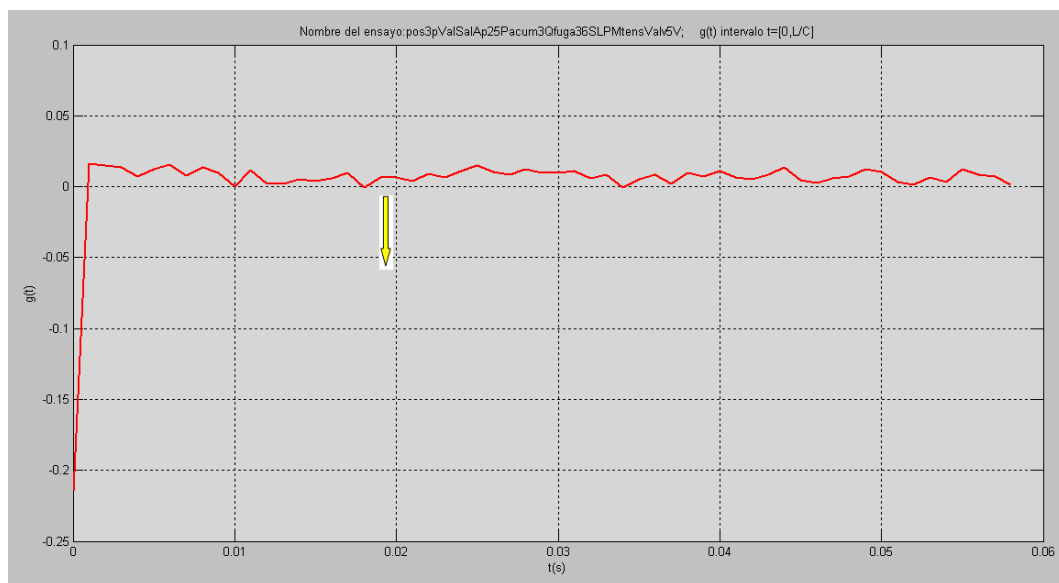
**Figura 8.10. Función $g(t)$ ensayo
pos2nValSalAp25Pacum5Qfuga36SLPMtensValv8V**

8.1.2.2 Fuga en posición PO 3+

Las gráficas de la función $g(t)$ para la posición PO 3+ deberían darse para un tiempo de 0.019 segundos, indicado con una flecha. Las Figura 8.11 y Figura 8.12 muestran $g(t)$ para el caso sin fuga y con fuga respectivamente, con una tensión de control de la electroválvula de 5 V y una presión a la salida del acumulador de 3 bar, y la válvula de salida abierta un 25%.

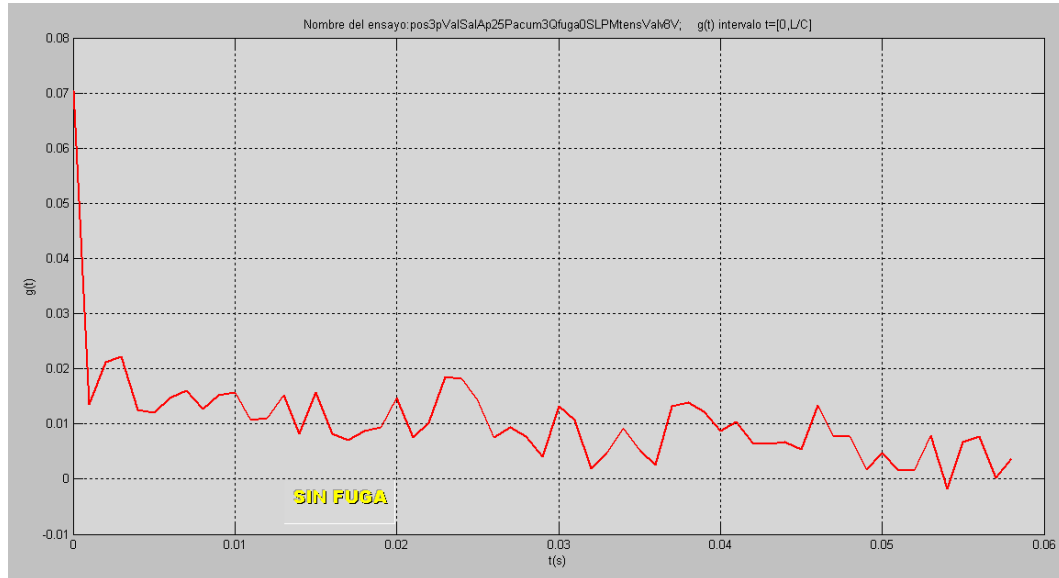


**Figura 8.11. Función $g(t)$ ensayo
pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga0SLPMtensValv5V**

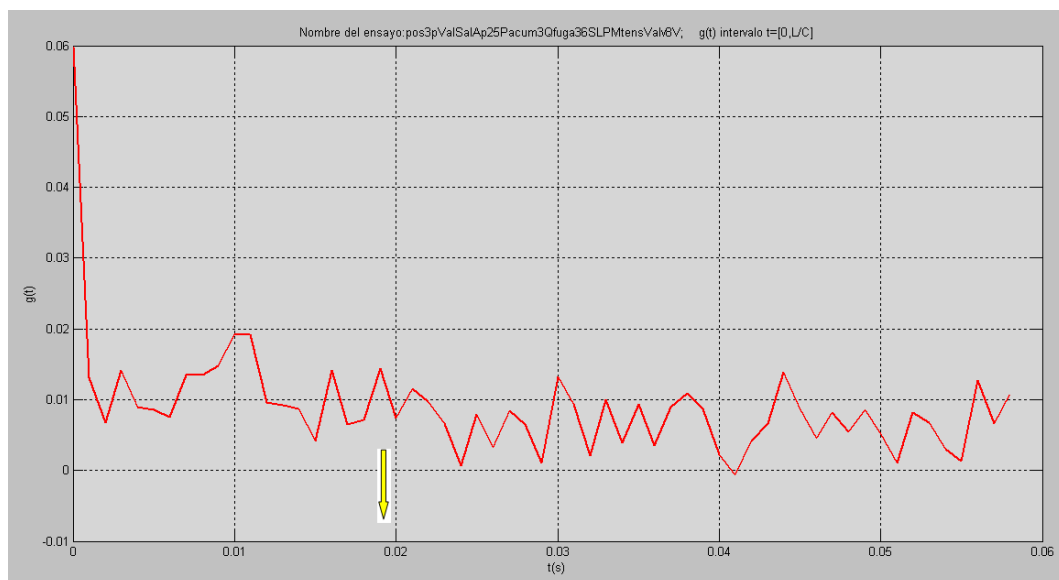


**Figura 8.12. Función $g(t)$ ensayo
pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga36SLPMtensValv5V**

Las Figura 8.13 y Figura 8.14 muestran la función $g(t)$ para el caso sin fuga y con fuga respectivamente, con una tensión de control de la electroválvula de 8 V y una presión a la salida del acumulador de 3 bar, y la válvula de salida abierta un 25%.

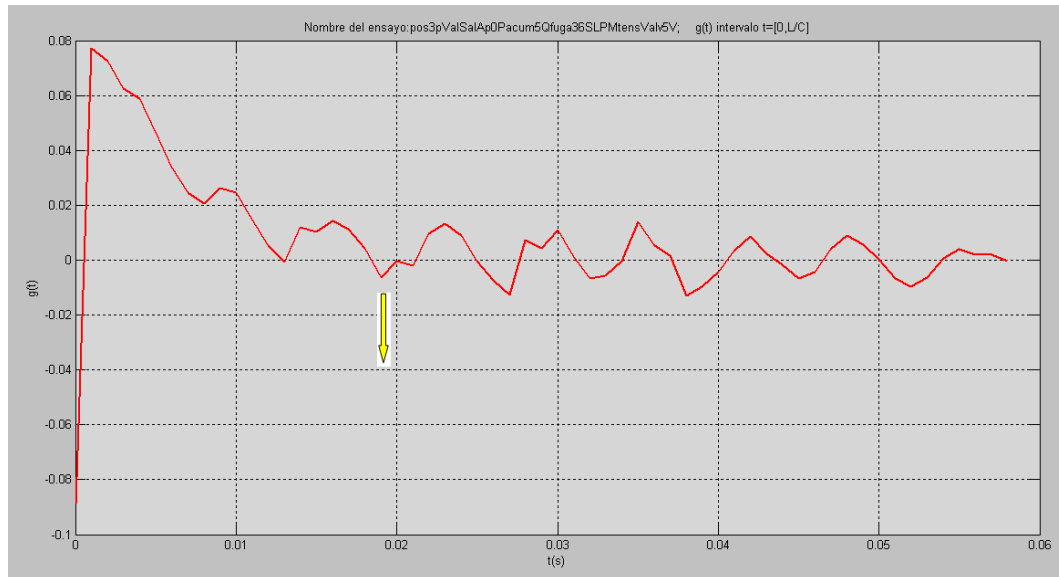


**Figura 8.13. Función $g(t)$ ensayo
pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga0SLPMtensValv8V**



**Figura 8.14. Función $g(t)$ ensayo
pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga36SLPMtensValv8V**

La Figura 8.15 muestra para la misma posición PO 3+ la función $g(t)$ para el caso con fuga, con una tensión de control de la electroválvula de 5 V y una presión a la salida del acumulador de 3 bar, y la válvula de salida cerrada, es decir 0%.



**Figura 8.15. Función $g(t)$ ensayo
pos3pValSalAp0Pacum5Qfuga36SLPMtensValv5V**

8.1.3 Conclusiones de las gráficas $g(t)$

De la observación de las gráficas presentadas no se observa la existencia del pico correspondiente con el valor de tiempo L/C que tarda el sonido en recorrer el tramo de tubería. Tampoco se observa el pico en la función $g(t)$ cuando existe fuga, o en todo caso puede aparecer mezclado con otros picos. Uno de los motivos puede ser la existencia de cierto ruido en las señales. Para intentar resolver el inconveniente se plantea el siguiente método que puede eliminar su efecto. Consiste en repetir el mismo ensayo un número determinado de veces. De esta manera el método elimina los picos que son de origen aleatorio de los que tienen una causa no aleatoria. Se ha fijado el número de repeticiones para el mismo ensayo en 10, y se han escogido los siguientes ensayos para aplicarlo

pos2nValSalAp25Pacum3Qfuga0SLPMtensValv5V

pos2nValSalAp25Pacum3Qfuga36SLPMtensValv5V

pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga0SLPMtensValv5V

pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga36SLPMtensValv5V

Se promedian los valores obtenidos de $g(t)$ para cada tiempo discreto y posteriormente se grafican.

8.1.4 Eliminación de picos aleatorios en la respuesta $g(t)$

Las gráficas con los valores promediados de $g(t)$ se muestran a continuación en las Figura 8.16, Figura 8.17, Figura 8.18 y Figura 8.19, para los ensayos antes codificados, respectivamente.

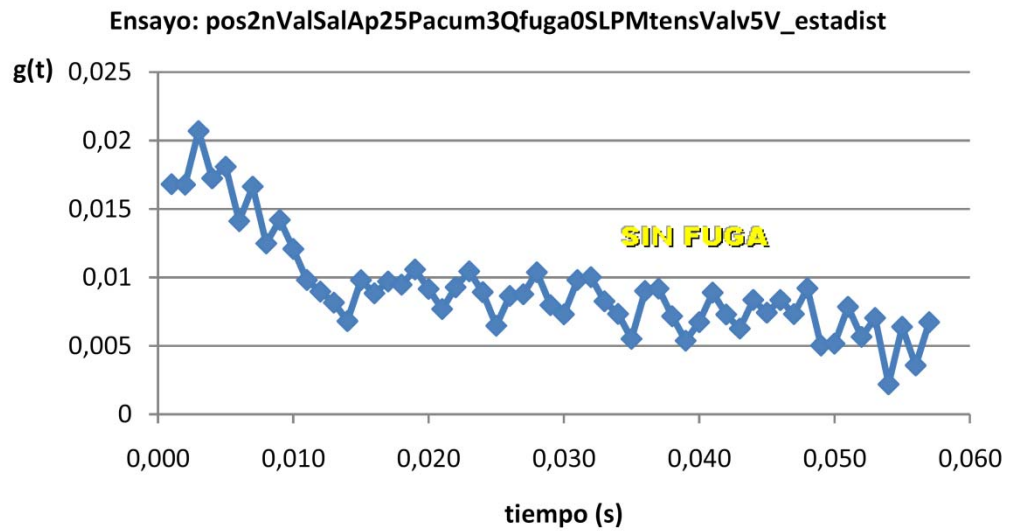


Figura 8.16. Función $g(t)$ promediada, ensayo
pos2nValSalAp25Pacum3Qfuga0SLPMtensValv5V

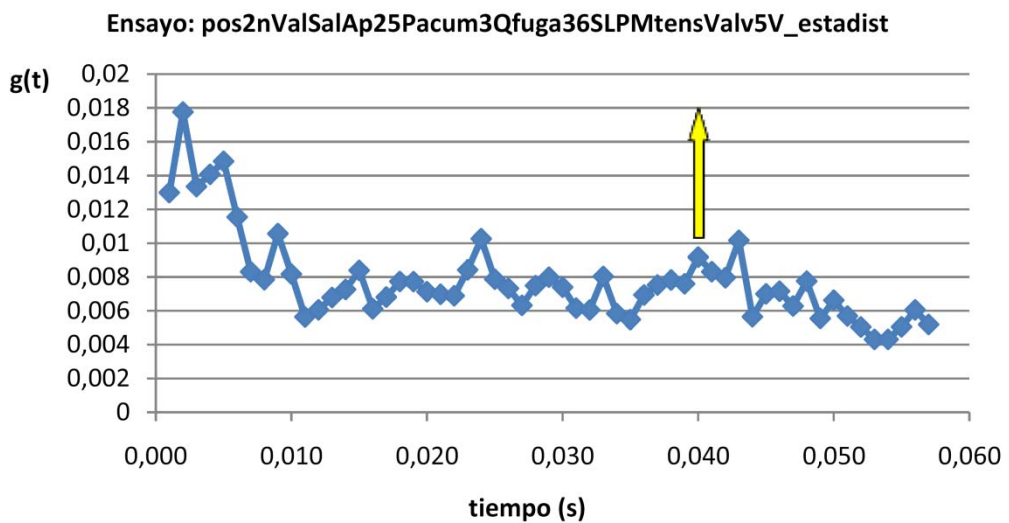


Figura 8.17. Función $g(t)$ promediada, ensayo
pos2nValSalAp25Pacum3Qfuga36SLPMtensValv5V

Ensayo: pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga0SLPMtensValv5V_estadist

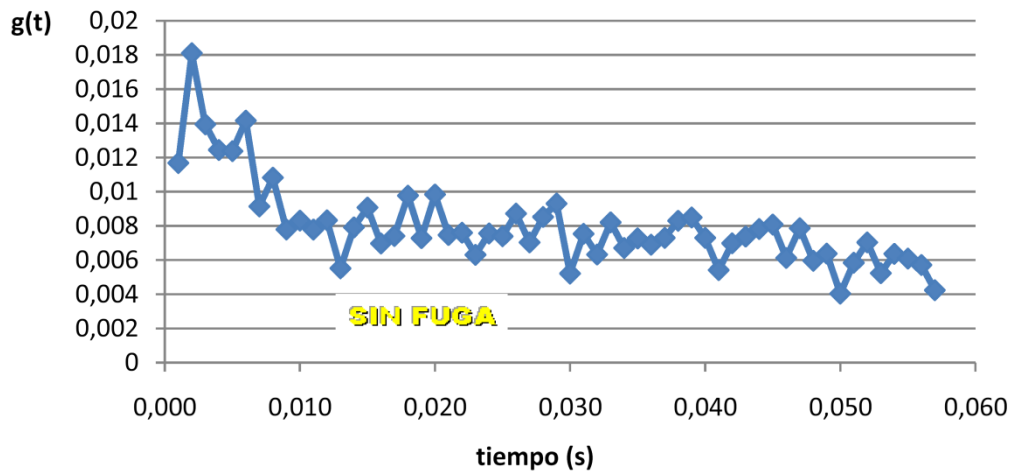


Figura 8.18. Función $g(t)$ promediada, ensayo
pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga0SLPMtensValv5V

Ensayo: pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga36SLPMtensValv5V_estadist

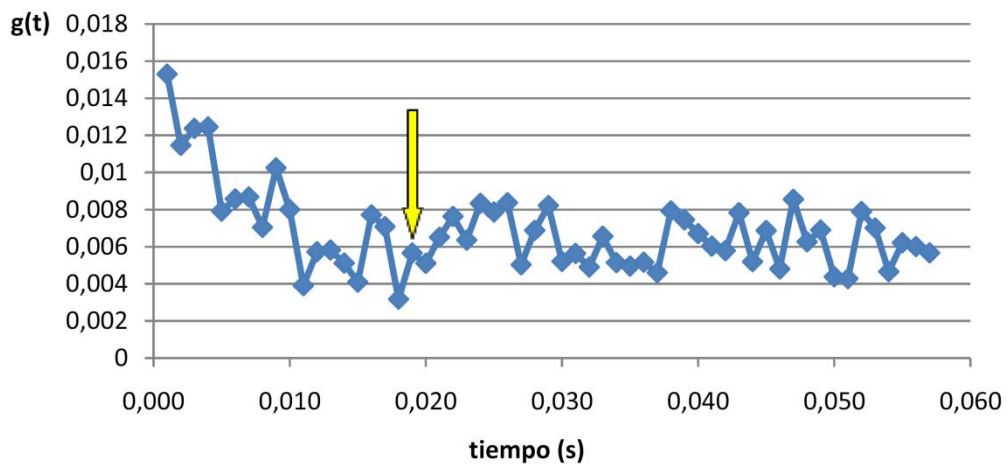


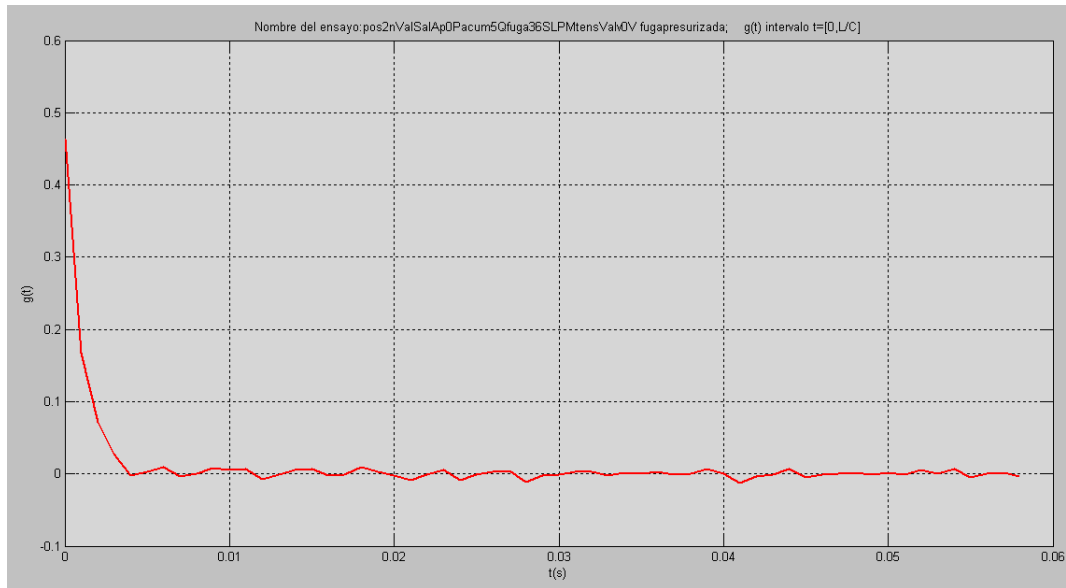
Figura 8.19. Función $g(t)$ promediada, ensayo
pos3pValSalAp25Pacum3Qfuga36SLPMtensValv5V

De la observación de las gráficas de $g(t)$ promediada se concluye que la repetición de los ensayos no elimina la causa que hace indistinguible el pico que indica la fuga en la función $g(t)$, por lo que o bien éste no existe o bien la causa que lo enmascara no es de tipo aleatorio.

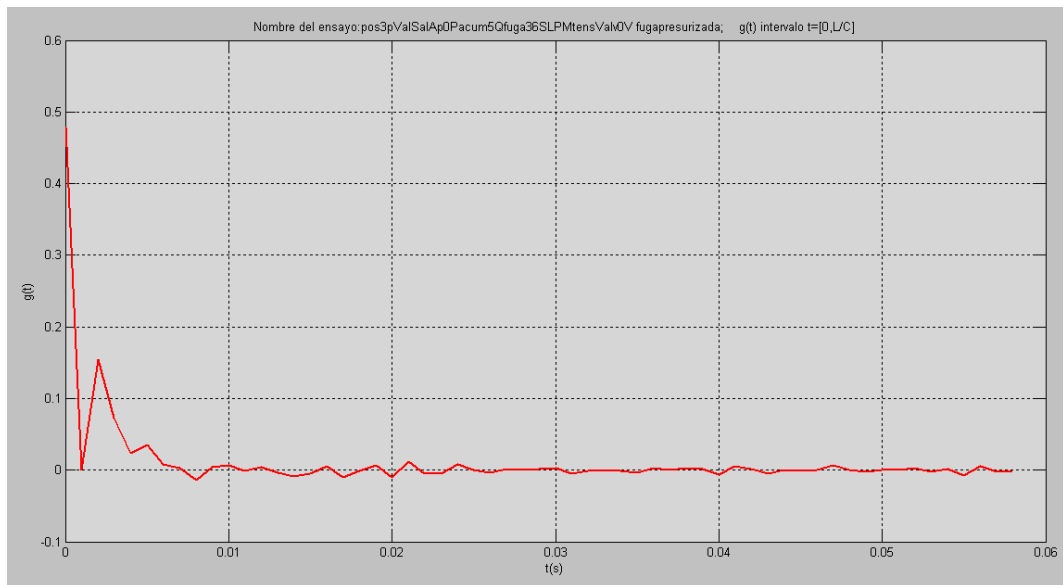
8.2 Ensayo de fuga en tubería presurizada sin caudal

Las Figura 8.20 y Figura 8.21 muestran la función $g(t)$ para el caso con fuga, con una presión a la salida del acumulador de 5 bar, para las posiciones de fuga simulada PO 2- y PO 3+, respectivamente.

De ellas no se puede inferir ninguna relación con la existencia ni la localización de la fuga durante el proceso de despresurización.



**Figura 8.20. Función $g(t)$ ensayo
pos2nValSalAp0Pacum5Qfuga36SLPMtensValv0V_fugapresurizada**



**Figura 8.21. Función $g(t)$ ensayo
pos3pValSalAp0Pacum5Qfuga36SLPMtensValv0V_fugapresurizada**

9 RESUMEN ECONÓMICO

El trabajo expuesto se ha realizado según el presupuesto de la Tabla 9.1, que asciende aproximadamente a 15,000.00 €.

PRESUPUESTO												
#	CODIGO	UD	DESCRIPCIÓN	PRECIO	A	B	C	D	MEDICIÓN	IMPORTE	IMPORTE SUBCAPITULO	IMPORTE CAPITULO
#	BANCO DE PRUEBAS DETERMINACIÓN DE FUGAS											15.066,00
0101	<i>MANO DE OBRA</i>											
	010101	MO0021	h Ingeniero	22,00	300,00				300,00	6.600,00	6.600,00	
0102	<i>MATERIALES</i>											2.936,00
	010201	MA0001	ud Suministro de la instalación preexistente del banco de pruebas	1.200,00	1,00				1,00	1.200,00		
	010202	MA0002	ud Suministro de electroválvula Matrix® modelo PX8619E3C2KK, tarjeta 9-Channel Driver Board PCM 8130 incluida	650,00	1,00				1,00	650,00		
	010203	MA0003	ud Suministro de transductor de presión de tipo piezoeléctrico, modelo 601A de Kistler®, incluido cable específico de conexión y adaptadores para montaje, para su uso en diversos proyectos	360,00	2,00	0,20			0,40	144,00		
	010204	MA0004	ud Suministro de transmisor de presión de tipo piezoresistivo, modelo 3296.074.001 de VDO®, para su uso en diversos proyectos	30,00	2,00	0,20			0,40	12,00		
	010205	MA0005	ud Suministro de caja de conexiones y maniobra para su uso con sensores de presión 601A de Kistler®, conteniendo la instalación de tres amplificadores de carga 5039A112 de Kistler®, una fuente de alimentación 220 VAC - 24 VDC con las protecciones reglamentarias, y un panel de mando para las funciones de marcha/paro, reset y rango de medida, para su uso en diversos proyectos	1.200,00	1,00	0,20			0,20	240,00		
	010206	MA0006	ud Suministro de caja de conexiones, fuente de alimentación y circuito para los tres transmisores de presión VDO®, para su uso en diversos proyectos	400,00	1,00	0,20			0,20	80,00		
	010207	MA0007	ud Suministro de caudalímetro modelo M-120SLPM-D de Alicat Scientific®, para su uso en diversos proyectos	500,00	1,00	0,20			0,20	100,00		
	010208	MA0008	ud Dispositivo de adquisición de datos PCI-1200 de National Instruments®, incluyendo bloque de conexiones, para su uso en diversos proyectos	1.800,00	1,00	0,20			0,20	360,00		
	010209	MA0009	ud Suministro de filtro analógico paso bajo FBU-8 LP de Audon Electronics®	150,00	1,00				1,00	150,00		
0103	<i>MAQUINARIA</i>											5.350,00
	010301	MQ0001	h Suministro de aire comprimido en laboratorio, hasta 6 bar de presión	35,00	100,00				100,00	3.500,00		
	010302	MQ0002	h Utilización de lugar de trabajo en laboratorio, incluye p.p. de consumos eléctricos y amortización de herramientas	2,00	150,00				150,00	300,00		
	010303	MQ0003	h Ordenador de laboratorio, incluyendo utilización de software básico	4,00	200,00				200,00	800,00		
	010304	MQ0004	ud Software específico de adquisición de datos LabView®, para su uso en diversos proyectos	3.000,00	1,00	0,20			0,20	600,00		
	010305	MQ0005	ud Software específico MATLAB® Student Version	150,00	1,00				1,00	150,00		
0104	<i>PARTIDAS ALZADAS</i>											180,00
	010401	PA0001	ud Partida alzada para pequeño material: cableado S-UTP CAT 5E, cableado eléctrico, clemas, interruptores y otro tipo de material fungible de laboratorio	180,00	1,00				1,00	180,00		

Tabla 9.1. Presupuesto aproximado para el desarrollo y puesta en marcha del banco de pruebas

10 IMPACTO AMBIENTAL DEL ESTUDIO

10.1 Medioambiente y ciclo de vida

Se llama impacto ambiental al efecto directo o indirecto que producen las acciones del hombre sobre el medioambiente. El impacto ambiental se puede clasificar como impactos positivos, fundamentalmente económicos pero en el caso que nos ocupa también físicos y biológicos por el beneficio que reporta su fin, e impactos negativos físicos como ruido y emisión de partículas, biológicos, socioeconómicos y sociales.

El desarrollo sostenible responde a las necesidades del presente sin poner en peligro las capacidades futuras de responder a las necesidades que se planteen

El banco de pruebas desarrollado, como producto concebido por el hombre que es, tiene un ciclo de vida que se debe tener en cuenta en la valoración del impacto ambiental asociado. El ciclo de vida comprende las fases de: planificación, proyecto, ejecución, mantenimiento y desmantelamiento.

10.2 Problemas medioambientales asociados

De forma general los problemas ambientales tales como el cambio climático, el efecto invernadero, la lluvia ácida, la pérdida de la biodiversidad, la degradación del paisaje y otros tienen como causas generadoras de éstos, a tres formas de contaminación según afecten al suelo, al agua o al aire.

Particularmente, los impactos negativos que son causas generadoras de los problemas ambientales mencionados, en el marco del trabajo desarrollado en este TFG, se relacionan a continuación:

Contaminación del suelo:

- por residuos industriales
- por residuos sólidos urbanos RSU
- por residuos de demolición y construcción RDC

Contaminación del agua:

- no aplica ningún impacto negativo, en el marco de este trabajo

Contaminación del aire:

- por emisiones acústicas
- por emisiones de partículas (concretamente por dispersión) no generadas por la propia actividad

Los residuos contaminantes del suelo pueden a su vez clasificarse según su peligrosidad como inertes, peligrosos y radiactivos. Estos últimos no aplican al caso particular que nos ocupa.

10.3 Marco normativo medioambiental

La legislación estatal recoge las directivas y reglamentos emitidos por la UE en materia de medioambiente. La Directiva 2008/98/CE sobre residuos es la de mayor afectación en el marco del trabajo desarrollado en este TFG. El Plan Nacional de Residuos integra a nivel estatal los requisitos de la directiva europea en cuanto a gestión de cada tipo de residuo, los cuales quedan regulados entre otros por los siguientes reales decretos que aplican al caso particular:

- RD 105/2008, de 1 de febrero, que regula la producción y gestión de los residuos sólidos urbanos y complementa la Ley de Residuos general
- RD 208/2005, de 25 de febrero, sobre aparatos eléctricos y electrónicos y la gestión de sus residuos
- RD 833/1988 y modificación posterior RD 952/1997 sobre residuos tóxicos y peligrosos

Adicionalmente existen normas de voluntario cumplimiento como la ISO 14001 que certifican los Sistemas de Gestión Medioambiental que las empresas tienen implantados.

10.4 Residuos generados asociados

Los residuos asociados al trabajo, generados en cualquier fase de la vida útil del banco de pruebas, se relacionan a continuación atendiendo a su peligrosidad.

Residuos inertes

- papel y cartón: procedentes de los embalajes de los materiales utilizados en la instalación

- plásticos: procedentes de envases y embalajes de los materiales utilizados en la instalación, tuberías y accesorios para neumática, material fungible de instalación eléctrica
- metales: tubería de cobre y accesorios, restos de herramientas
- madera: procedente de la estructura sobre la que se monta el banco de pruebas

Residuos peligrosos

- material electrónico: ordenador, tarjeta de adquisición de datos, electroválvulas, instrumentación de medida (de presión y de caudal), cables
- pilas y baterías: por ejemplo del multímetro para mediciones

10.5 Emisiones generadas asociadas

Las emisiones atmosféricas asociados al trabajo realizado, generados en cualquier fase de la vida útil del banco de pruebas, se relacionan a continuación.

Emisiones acústicas

Son las producidas, durante la realización de los ensayos, por el aire comprimido al salir por el extremo abierto de la tubería del banco de pruebas. Estas emisiones están limitadas al lugar de trabajo del Laboratorio de Neumática, por lo que su afectación a nivel medioambiental es menor y en cambio sí se debe tener en cuenta al establecer las medidas de protección en materia de seguridad y salud en el trabajo.

Emisiones de partículas

Las emisiones de partículas están asociadas al aire a presión con el que se trabaja durante los ensayos y que dispersa las partículas depositadas en el laboratorio. No se trata por tanto de partículas generadas por la actividad, y su afectación se limita a las medidas de protección en materia de seguridad y salud en el trabajo.

10.6 Actuaciones y buenas prácticas

Las actuaciones llevadas a cabo en las fases de planificación, proyecto y ejecución, así como las futuras buenas prácticas recomendadas para las fases de mantenimiento y desmantelamiento, con el objetivo de contribuir a la reducción de los problemas medioambientales expuestos, son las siguientes.

- Aplicación de la jerarquía de residuos en todas las fases del producto, en el orden siguiente: prevención, preparación para la reutilización, reciclado, darle otra valorización y finalmente su eliminación.
- Reutilización de todos los aparatos, equipos, materiales, instrumentos e instalaciones del banco de pruebas, fundamentalmente provenientes de usos anteriores existentes en el laboratorio, limitando al máximo la compra de material nuevo.
- Separación en origen de los residuos sólidos urbanos o industriales asimilables a urbanos generados tales como papel y envases.
- Separar los residuos de lo que pueden ser materiales valorizables que se pueden reutilizar o reciclar.
- Reducción del consumo de aire comprimido al mínimo necesario durante los ensayos, contribuyendo a un menor consumo energético y reduciendo las emisiones acústicas y de partículas.
- Aprovechar la luz natural y apagar la iluminación y todos los equipos eléctricos, electrónicos y compresores de aire del laboratorio al finalizar la jornada
- Utilización de contenedores separados adecuados a cada residuo, según disponibilidad.
- Utilización de los puntos limpios de los ayuntamientos o de un gestor autorizado para eliminar los residuos peligrosos como los electrónicos, pilas y baterías.
- Conocer el etiquetado de los residuos peligrosos para saberlos identificar.

10.7 Consideraciones finales

Mediante estas actuaciones y buenas prácticas recomendadas se considera que se contribuye a cumplir los objetivos cualitativos del Plan Nacional Integrado de Residuos en cuanto a reducir en origen la generación de residuos, a la correcta gestión de los residuos peligrosos, a la valorización de todos ellos mediante la reducción, el reciclaje y la reutilización, y a la aplicación del principio de jerarquía sobre los residuos.

Para la elaboración de éste capítulo se ha consultado la información disponible del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (13).

11 PLANIFICACIÓN Y PROGRAMACIÓN

11.1 Fase desarrollada

Se presentan a continuación la planificación de las actividades necesarias para la consecución de los objetivos marcados en este TFG, así como su programación en el tiempo que ha permitido alcanzarlos en el plazo previsto.

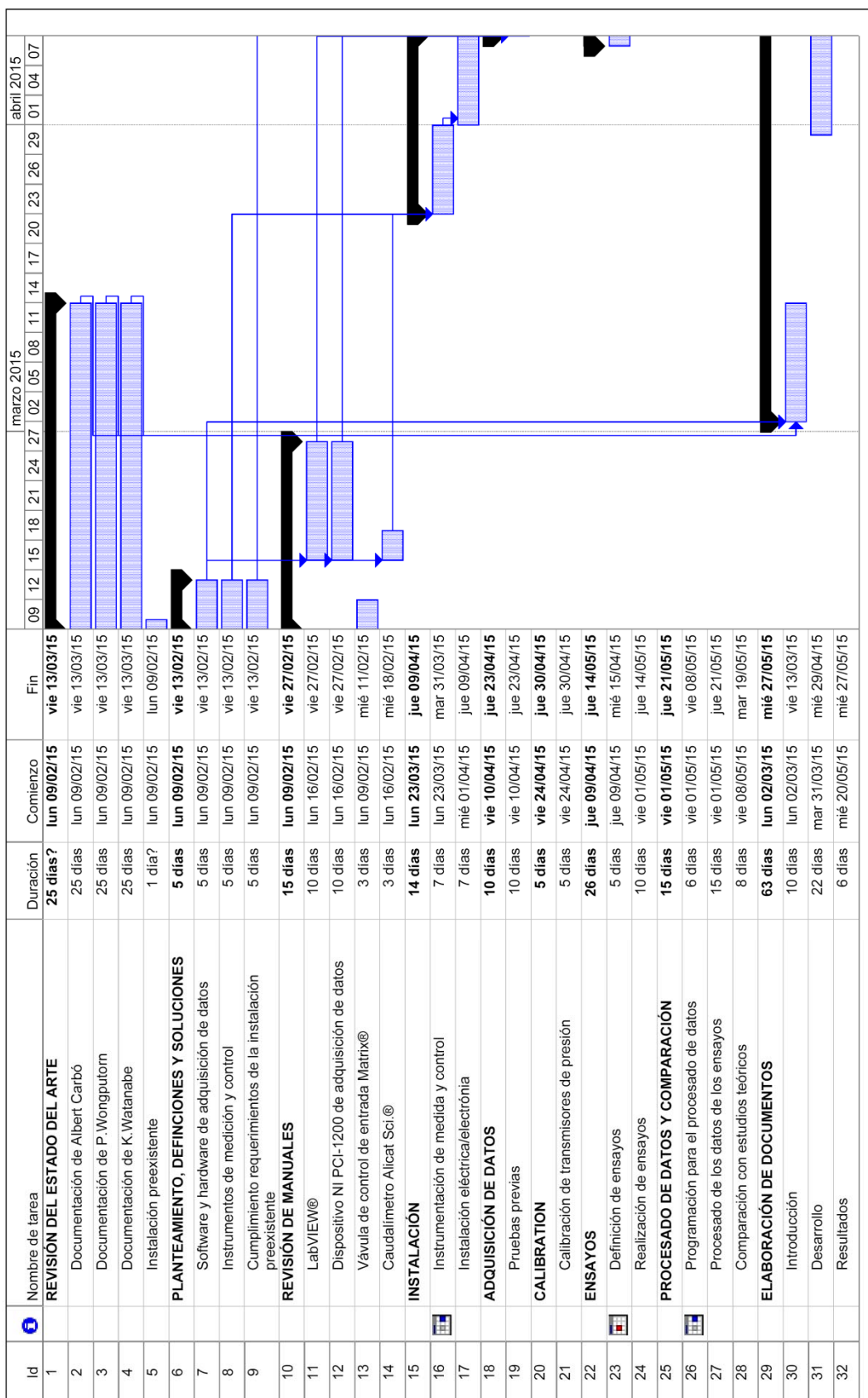


Figura 11.1. Programación de la fase desarrollada (1/2)

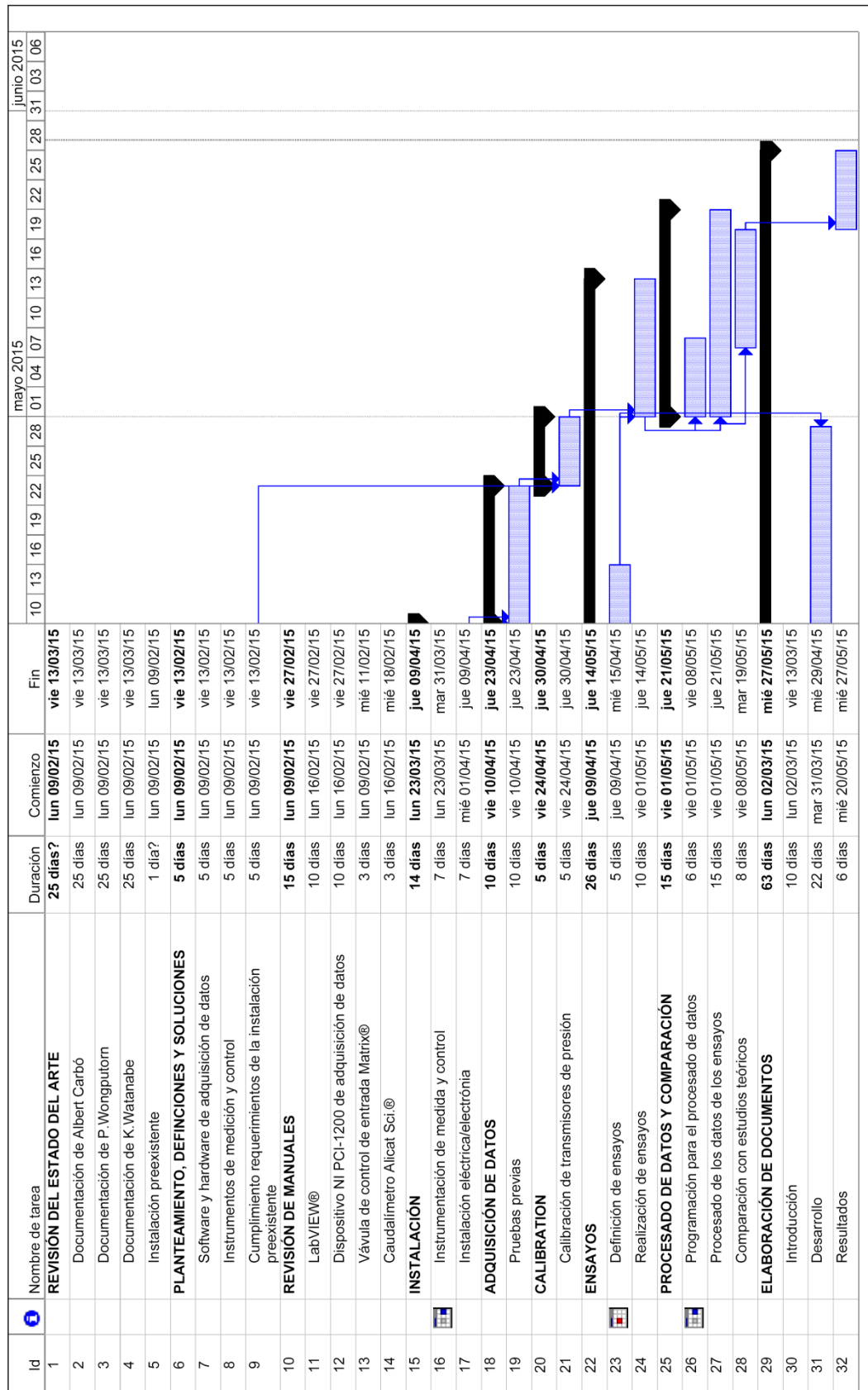


Figura 11.2. Programación de la fase desarrollada (2/2)

11.2 Planificación de fases posteriores

Se propone a continuación la planificación de las actividades en fases posteriores a la realización de este TFG, de acuerdo con la propuesta de continuación expuesta en el capítulo 13 sobre conclusiones y recomendaciones, ordenadas cronológicamente hacia futuro.

- Limitar las fuentes de ruido que puedan interferir.
- Realizar ensayos con diferentes intervalos de tiempo de muestreo.
- Realizar ensayos con otras frecuencias de apertura de la electroválvula y con otras amplitudes y valores de tensión.
- Generar el ruido blanco requerido en el estudio mediante otra técnica o fuente de ruido que no sea la apertura y cierre de la electroválvula.
- Profundizar en el estudio del funcionamiento de los transductores de presión Kistler® para adecuar mejor el comportamiento de éstos a las presiones que se han de leer.

12 SEGURIDAD Y SALUD

12.1 Marco normativo

El marco normativo básico en materia de prevención de riesgos laborales que afecta al desarrollo del trabajo expuesto es la Ley de Prevención de Riesgos Laborales Ley 31/1995, de 8 de noviembre, desarrollada a partir de la directiva marco europea 89/391/CEE del consejo, de 12 de junio de 1989, y de las directivas europeas 91/383/CEE, 92/85/CEE y 94/33/CEE, del convenio 155 de la Organización Internacional del Trabajo, y del propio Art.40.2 de la Constitución Española.

Para la elaboración de éste capítulo se ha consultado la información disponible del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (14).

El objetivo de este capítulo es el de establecer, durante el desarrollo del trabajo expuesto, las medidas a tomar respecto a prevención de riesgos laborales a las que se refiere en el Art.6 del Capítulo III la mencionada Ley de Prevención de Riesgos Laborales. Concretamente, las normas reglamentarias de desarrollo a que se refiere el citado Art.6 que afectan en mayor importancia al trabajo realizado son, ordenados según la temática, los siguientes:

Locales e instalaciones:

Locales de trabajo

- RD 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo.
- RD 485/1997, 14 de abril, sobre disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en el trabajo.

Instalaciones eléctricas

- RD 614/2001, de 8 de junio, sobre disposiciones mínimas para la protección de la salud y seguridad de los trabajadores frente al riesgo eléctrico.
- RD 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión.

Equipos de trabajo y de protección individual:

Equipos de trabajo

- REAL DECRETO 1215/1997, de 18 de julio por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo.

Equipos de protección individual

- RD 773/1997, 30 de mayo, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización por los trabajadores de equipos de protección individual.

Equipos a presión y otros equipos específicos

- RD 1495/1991, de 11 de octubre. Disposiciones de aplicación de la Directiva del Consejo de las Comunidades Europeas 87/404/CEE, sobre recipientes a presión simples.
- RD 769/1999, de 7 de Mayo de 1999, dicta las disposiciones de aplicación de la Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo, 97/23/CE, relativa a los equipos de presión y modifica el RD 1244/1979, de 4 de Abril de 1979, que aprobó el Reglamento de aparatos a presión.
- RD 2060/2008, de 12 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de equipos a presión y sus instrucciones técnicas complementarias.

Agentes ambientales:

Ruido y vibraciones

- RD 286/2006 (Ruido) REAL DECRETO 286/2006, de 10 de marzo, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido.

12.2 Descripción del trabajo y su entorno

12.2.1 Tipo de trabajo y ubicación

El trabajo presentado se desarrolla fundamentalmente en el Laboratorio de Neumática del Departamento de Mecánica de Fluidos de la ETSEIAT – UPC, y puntualmente en despachos u oficinas. Consiste en la instalación de instrumentos de medida y control, y la instalación neumática, eléctrica y electrónica necesaria para implementar un banco de pruebas para la detección de fugas en tuberías, así como la realización de ensayos en éste.

12.2.2 Interferencias

Las interferencias que afectan al desarrollo del trabajo son las propias de la existencia de otros trabajos desarrollándose paralelamente en el mismo laboratorio, todos ellos en el marco de la neumática. Las medidas a tomar ante estas interferencias serán:

- La información de los trabajos que se están desarrollando, en cuanto a la identificación del responsable de su ejecución, así como de su naturaleza, su radio de afectación, etc.
- La utilización adecuada de los EPI que estos trabajos interferentes requiera, pese a no ser necesarios para el trabajo que se desarrolla.
- No se deberá tocar, manipular o accionar el resto de maquinaria, equipos de trabajo, materiales i/o instalación de los trabajos que interfieran, que no sea necesario para el desarrollo del propio trabajo.
- Se proveerá y mantendrá toda la señalización, guardas, etc. para la protección de las instalaciones o para la seguridad de terceros.

12.2.3 Unidades que componen el trabajo

Las unidades principales en que se agrupan las tareas a realizar son las siguientes:

- Instalación neumática y de fontanería
- Instalación eléctrica
- Instalación de instrumentos de medida y de control y conexión hardware
- Realización de pruebas y ensayos
- Programación del software y redacción de informes

12.3 Riesgos y normas de actuación

La metodología utilizada para realizar la evaluación de riesgos consiste en identificar el *factor de riesgo* y asociarle los *riesgos* derivados de su presencia. Para la evaluación de los riesgos se utiliza el concepto *grado de riesgo* (GR), obtenido de la valoración conjunta de la *probabilidad* (PB) de que se produzca el daño y la *severidad* (SV) de las consecuencias del mismo. Se establecen cinco niveles de grado de riesgo obtenidos de las diferentes combinaciones de probabilidad y severidad, mostrados en la Tabla 12.1.

Severidad Probabilidad	Alta	Media	Baja
Alta	Muy Alto	Alto	Moderado
Media	Alto	Moderado	Bajo
Baja	Moderado	Bajo	Muy Bajo

Tabla 12.1. Presupuesto aproximado para el desarrollo y puesta en marcha del banco de pruebas

12.3.1 Instalación neumática y de fontanería

Los riesgos más frecuentes en esta unidad de trabajo son los de la Tabla 12.2.

RIESGOS	PB	SV	GR
• Caída al mismo nivel.	M	B	B
• Heridas producidas por objetos punzantes o tajantes.	B	B	MB
• Sobreesfuerzos.	M	B	B
• Golpes con objetos y herramientas.	M	M	M

Tabla 12.2. Riesgos más frecuentes en instalación neumática y de fontanería

Las normas básicas de seguridad a cumplir serán:

- La iluminación de los trabajos de fontanería será de un mínimo de 100 lux medidos a una altura sobre el nivel del pavimento, en torno a los 2 metros.

Las protecciones individuales o colectivas a utilizar serán: zapatos de seguridad, guantes de cuero, goma o P.V.C.

12.3.2 Instalación eléctrica

Los riesgos más frecuentes en esta unidad de trabajo son los de la Tabla 12.3.

RIESGOS	PB	SV	GR
• Golpes y cortes con objetos.	M	M	M
• Contactos eléctricos.	B	A	M
• Quemaduras	M	M	M

Tabla 12.3. Riesgos más frecuentes en instalación eléctrica

Las normas básicas de seguridad a cumplir serán:

- Comprobar en el punto de trabajo la ausencia de tensión.

- Protección frente a sobre intensidades: cortacircuitos fusibles e interruptores automáticos.
- Notificación de anomalías en las instalaciones siempre que se detecten.
- No eliminar los dispositivos de seguridad que lleve la maquinaria o aparatos de protección.

Las protecciones individuales o colectivas a utilizar serán: zapatos de seguridad, guantes de cuero y/o aislantes, detectores de ausencia de tensión.

12.3.3 Instalación de instrumentos de medida y conexión hardware

Los riesgos más frecuentes en esta unidad de trabajo son los de la Tabla 12.4.

RIESGOS	PB	SV	GR
• Heridas producidas por objetos punzantes o tajantes.	B	B	MB
• Golpes con objetos y herramientas.	M	M	M

Tabla 12.4. Riesgos más frecuentes en instalación de instrumentos y conexión hardware

Las normas básicas de seguridad a cumplir serán:

- Prestar atención en el acceso al lugar de instalación.

Las protecciones individuales o colectivas a utilizar serán: guantes.

12.3.4 Realización de pruebas y ensayos

Los riesgos más frecuentes en esta unidad de trabajo son los de la Tabla 12.4.

RIESGOS	PB	SV	GR
• Rotura de la manguera de presión.	B	M	B
• Proyección de fragmentos o partículas.	M	M	M
• Ruidos y vibraciones	M	B	B

Tabla 12.5. Riesgos más frecuentes en la realización de ensayos

Las normas básicas de seguridad a cumplir serán:

- Antes del comienzo de la actividad se identificarán las instalaciones eléctricas y de aire comprimido existentes en la zona de trabajo, así

como sus cajas de protección y maniobra, y válvulas de seguridad y de corte de suministro.

- Mantener el área de trabajo ordenada y limpia de materiales, herramientas, utensilios, suciedad, etc. que pudieran resultar proyectadas.
- No exponerse a los puntos de salida del aire comprimido.
- Prestar atención en los desplazamientos para evitar torceduras y llevar el calzado adecuado.
- Quedará prohibido manipular o utilizar cualquier aparato, válvula o instrumento de las instalaciones en servicio.
- No se podrá almacenar material sobre las conducciones en servicio.
- Queda prohibido utilizar las tuberías, válvulas, etc., como puntos de apoyo para o suspender o levantar cargas.

Las protecciones individuales o colectivas a utilizar serán: protectores anti-ruido (tapones), gafas de seguridad anti-proyecciones.

12.4 Equipos de protección individual

Todo elemento de protección personal relacionado en el apartado anterior se ajustará a lo especificado en el R.D. 1407/92 "Equipos de Protección Individual. Comercialización en la Unión Europea". En el caso de que no exista Norma de Certificación o de Homologación Oficial, serán de calidad adecuada a sus respectivas prestaciones.

13 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones del trabajo realizado, de acuerdo con el objeto y el alcance de este TFG, son las siguientes.

- Se ha estudiado una metodología teórica existente en la bibliografía para la localización de fugas en tuberías, a fin de testarla en un banco de pruebas de laboratorio, y se ha desarrollado el estado del arte en la materia.
- Se han planteado las necesidades que debe cubrir el banco de pruebas, tanto en su instalación, instrumentación y definición de ensayos a realizar, para poder llevar a cabo ensayos en la línea del estudios teórico expuesto.
- Se ha partido de una instalación preexistente, y se ha verificado y justificado el cumplimiento de los requerimientos necesarios para su uso acorde con el anteriormente mencionado estudio teórico.
- Se ha propuesto una solución para la instrumentación de medida y de control y el hardware y software para la adquisición de datos que permite realizar mediciones según las especificaciones requeridas por el estudio teórico.
- Se han realizado los ensayos planteados para corroborar experimentalmente los resultados teóricos existentes.
- Se han procesado los datos experimentales obtenidos y se han comparado con los teóricamente esperables, no habiéndose confirmado éstos.
- Se ha intentado eliminar, mediante la repetición de ensayos, los efectos aleatorios que pudiesen interferir en los resultados teóricos esperables, sin haber conseguido eliminarlos.
- Tampoco se ha podido inferir relación alguna en el ensayo de fuga en tubería presurizada.
- Se ha diseñado, construido un banco de pruebas que permite experimentar en el campo de la localización de fugas en tuberías, y puede ser el punto de partida de futuros ensayos e investigaciones.

Las recomendaciones en cuanto a futuras investigaciones son las siguientes:

- Limitar las fuentes de ruido que puedan interferir.
- Realizar ensayos con diferentes intervalos de tiempo de muestreo.
- Realizar ensayos con otras frecuencias de apertura de la electroválvula y con otras amplitudes y valores de tensión.

- Generar el ruido blanco requerido en el estudio mediante otra técnica o fuente de ruido que no sea la apertura y cierre de la electroválvula.
- Dada la importancia de las precisas lecturas de las presiones realizadas con los transductores de presión *Kistler®* sean, se recomienda profundizar en el estudio del funcionamiento de los transductores de presión *Kistler®* y de la configuración de los amplificadores de carga, y hacer las modificaciones necesarias para adecuar el comportamiento de éstos al rango de presiones y frecuencias que se requieren leer.

14 LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

x	distancia desde un origen
L	longitud de una tubería
l^-	longitud de una tubería desde el origen hasta el comienzo de la sección del orificio por donde hay una fuga
l^+	longitud de una tubería desde el origen hasta el final de la sección del orificio por donde hay una fuga
l	longitud de una tubería desde el origen hasta el centro de la sección del orificio por donde hay una fuga
$p(x, t)$	presión
$p_i(t)$	presión en el punto de inicio del tramo de tubería considerado
$p_o(t)$	presión en el punto final del tramo de tubería considerado
t	tiempo
C_0	velocidad del sonido en el fluido en reposo
$f(x, t)$	velocidad del volumen de sonido propagándose hacia delante
C_f	velocidad total del sonido propagándose hacia delante
$b(x, t)$	velocidad del volumen de sonido propagándose hacia atrás
C_b	velocidad total del sonido propagándose hacia atrás
v	velocidad del fluido en la tubería
A	área de la sección transversal de la tubería
$u(x, t)$	velocidad total del volumen de sonido
$P(x, i\omega)$	transformada de Fourier de la función presión $p(x, t)$
$U(x, i\omega)$	transformada de Fourier de la función velocidad total del volumen de sonido $u(x, t)$
z	variable arbitraria

$F(z)$	matriz de transferencia que caracteriza la propagación acústica en una tubería
e_{ij}	coeficiente del elemento (i, j) de la matriz de transferencia $F(z)$
i	unidad imaginaria $\sqrt{-1}$
v'	velocidad del fluido en la tubería afectada por la velocidad del sonido en el fluido en reposo C_0
C'	velocidad del sonido en el fluido afectada por el flujo en la tubería
Z_l	impedancia acústica radiacional de la fuga
d	área de la sección por donde se produce la fuga en la tubería
\tilde{k}	coeficiente de compensación de la impedancia acústica radiacional de la fuga
f_{ij}	elemento (i, j) de la matriz de transferencia $F(z)$
$G(i\omega)$	función de transferencia, transformada de Fourier de $g(t)$
$G(\omega)$	aproximación de la función de transferencia $G(i\omega)$ para el caso de bajas frecuencias y velocidad del fluido despreciable
K_W	constante determinada por la sección por donde se produce la fuga
$G_i(\omega)$	término i -ésimo de la función de transferencia $G(\omega)$
$g(t)$	transformada inversa coseno de Fourier de $G(\omega)$ en la banda de frecuencias $\omega_l \leq \omega \leq \omega_h$
$g_i(t)$	término i -ésimo de la función $g(t)$
t_L	tiempo transcurrido cuando el pulso ocurre debido al choque con el final del tramo de tubería
t_l	tiempo transcurrido cuando el pulso ocurre debido a una fuga en la tubería a una distancia l desde el origen
DFT	transformada discreta de Fourier
$IDFT$	transformada discreta inversa de Fourier

FFT	transformada rápida de Fourier
m	frecuencia angular discreta
k	tiempo discreto
Re	parte real
f_M	frecuencia de muestreo de una señal
f_h	frecuencia máxima de una señal
t_M	intervalo de tiempo de muestreo de una señal
P_{ACUM}	presión relativa a la salida del depósito acumulador del banco de pruebas
V_V	tensión de la señal de control de la electroválvula

Griegas

∂	derivada parcial
π	3.1415926...
ρ	densidad del fluido
ω	frecuencia angular
ω_l	frecuencia angular mínima de la señal considerada
ω_h	frecuencia angular máxima de la señal considerada
ω_m	frecuencia angular efectiva máxima de la señal considerada
ε	parámetro de curvatura adimensional
Δx	resolución mínima en la localización de la fuga
τ_m	intervalo de tiempo de muestreo

15 BIBLIOGRAFÍA

1. *Detection and location of a leak in a gas-transport pipeline by a new acoustic method.* **Watanabe, Kajiro y Himmelblau, D.M.** Oct de 1986, AIChE Journal, Vol. 32, págs. 1690-1701.
2. *API RP 1130: Computational Pipeline Monitoring for liquids.* American Petroleum Institute. 2007.
3. *Speech Synthesis.* **Ohizumi, J. et al.** Tokyo : s.n., 1968, Lattice Publishing Company.
4. **Wikipedia, Colaboradores de.** Wikipedia, La enciclopedia libre. *Instrumentación industrial.* [En línea] 2014. [Citado el: 29 de abril de 2015.] http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Instrumentaci%C3%B3n_industrial&oldid=76466000.
5. —. Wikipedia, La enciclopedia libre. *Conversión analógica-digital.* [En línea] 2015. [Citado el: 6 de mayo de 2015.] http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Conversi%C3%B3n_anal%C3%B3gica-digital&oldid=81747927.
6. —. Wikipedia, La enciclopedia libre. *Teorema de muestreo de Nyquist-Shannon.* [En línea] 2015. [Citado el: 6 de mayo de 2015.] http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Teorema_de_muestreo_de_Nyquist-Shannon&oldid=81084822.
7. Matrix S.p.A. Pneumatic Division - General Catalogue - English Version - Code 861.101H Rev.01.
8. Instruction Manual - Piezoelectric sensor Type 601A 601H - Kistler Instrumente AG.
9. Instruction Manual - Miniature Charge Amplifier Type 5039A... - Kistler Instrumente AG.
10. Alicat Scientific - Operating Manual - Precision Gas Mass Flow Meters - DOC ALIMAN16.
11. *DAQ NI PCI-1200 User Manual - Multifunctional I/O Device por PCI Bus Computers.* Austin, Texas : National Instruments Corporation, 2002. Part Number 320942D-01.

12. *LabView Data Acquisition Basics Manual*. Austin, Texas : National Instruments Corporation, 1998. Part Number 320997C-01.

13. **Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente**. <http://www.magrama.gob.es>. [En línea] [Citado el: 10 de 5 de 2015.]

14. **Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo**. <http://www.insht.es>. [En línea] [Citado el: 10 de 5 de 2015.]

15. **Carbó Bech, Albert y De las Heras Jiménez, Salvador**. *Pipelines leak detection by transient-based method using MATLAB functions*. UPC. 2014, no publicado.

16. *A survey of modeling techniques for fluid transmission line transients*. **Goodson, R.E. y Leonard, R.G.** 94, Junio de 1972, ASME Journal of Fluids Engineering, págs. 474-482.

17. **Nursilo, W.S.** *Fluid transmission line dynamics*. The University of Texas at Arlington. Arlington, Texas, 2000. Tesis doctoral.

18. *Application of MATLAB functions for time domain simulation of systems with lines with transients*. **Wongputorn, Patompong, y otros**. 22 de Mar de 2005, Journal of Fluids Engineering, Vol. 127, págs. 177-182.

19. **Woods, R.L. y Lawrence, K.L.** *Modeling and simulation of dynamic systems*. New Jersey : Prentice-Hall, 1997.